

SÉRIE A : N° 1570

N° D'ORDRE :

2436

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

E. HOCHARD

Ancien élève de l'Ecole Normale Supérieure
Agrége de l'Université

1^{re} THÈSE. — MESURE DE PETITS COURANTS THERMO-ÉLECTRIQUES : APPLICATION A L'ÉTUDE D'UN FAISCEAU DE RAYONS INFRA-ROUGES POLARISÉ ELLIPTIQUEMENT.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 25/6/1935 devant la Commission d'examen

MM. H. ABRAHAM..... *Président.*

A. COTTON.....

R. LESPIEAU..... } *Examineurs.*

PARIS

SOCIÉTÉ GÉNÉRALE D'IMPRIMERIE ET D'ÉDITION

17, RUE CASSETTE, 17

—
1935

SÉRIE A : N° 1570

N° D'ORDRE :

2436

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

E. HOCHARD

Ancien élève de l'Ecole Normale Supérieure
Agrégré de l'Université

1^{re} THÈSE. — MESURE DE PETITS COURANTS THERMO-ÉLECTRIQUES : APPLICATION A L'ÉTUDE D'UN FAISCEAU DE RAYONS INFRA-ROUGES POLARISÉ ELLIPTIQUEMENT.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le

1935 devant la Commission d'examen

MM. H. ABRAHAM.....

Président.

A. COTTON.....

R. LESPIEAU.....

} *Examineurs.*

PARIS
SOCIÉTÉ GÉNÉRALE D'IMPRIMERIE ET D'ÉDITION

17, RUE CASSETTE, 17

1935

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

MM.

Doyen honoraire..... M. MOLLIARD.
Doyen C. MAURAIN, Professeur, Physique du globe.

Professeurs honoraires

H. LE CHATELIER.
H. LEBESGUE.
A. FERNBACH.
A. LEDUC.
Emile PICARD.
Rémy PERRIER.

LÉON BRILLOUIN.
GOURSAT.
WALLERANT.
GUILLET.
PÉCHARD.
FREUNDLER.

AUGER.
BLAISE.
DANGEARD.
JANET.
LESPIEAU.
MARCHIS.
MOUTON.

PROFESSEURS

G. BERTRAND....	T Chimie biologique.	A. DEBIERNE....	T Physique générale et Radioactivité.
M. CAULLERY....	T Zoologie (Évolution des êtres organisés).	A. DUFOUR.....	T Physique. P.C.B.
G. URBAIN.....	T Chimie générale.	L. DUNOYER....	Optique appliquée.
Emile BOREL....	T Calcul des probabilités et Physique mathématique.	A. GUILLIERMOND.	T Botanique. P.C.B.
Jean PERRIN....	T Chimie physique.	M. JAVILLIER....	Chimie biologique.
H. ABRAHAM....	T Physique.	L. JOLEAUD....	Paléontologie.
E. CARTAN.....	T Géométrie supérieure.	ROBERT-LÉVY....	Zoologie.
M. MOLLIARD....	T Physiologie végétale.	F. PICARD.....	Zoologie (Évolution des êtres organisés).
L. LAPICQUE....	T Physiologie générale.	Henri VILLAT...	T Mécanique des fluides et applications.
E. VESSIOT.....	T Mécanique analytique et Mécanique céleste.	Ch. JACOB.....	T Géologie.
A. COTTON.....	T Recherches physiques.	P. PASCAL.....	T Chimie minérale.
J. DRACH.....	T Analyse supérieure et Algèbre supérieure.	M. FRÉCHET....	T Calcul des Probabilités et Physique mathématique.
Charles FABRY..	T Enseignement de physique.	E. ESCLANGON..	T Astronomie.
Charles PÉREZ..	T Zoologie.	M ^{me} RAMART-LUCAS.	T Chimie organique.
Léon BERTRAND..	T Géologie structurale et géologie appliquée.	H. BÉGHIN.....	T Mécanique physique et expérimentale.
P. PORTIER.....	T Physiologie comparée.	Foch.....	Mécanique expérimentale des fluides.
E. RABAUD.....	T Biologie expérimentale.	PAUTHENIER....	Physique. P.C.B.
M. GUICHARD....	Chimie minérale.	DE BROGLIE....	T Théories physiques.
Paul MONTEL...	T Théorie des fonctions et théorie des transformations.	CHRÉTIEN.....	Optique appliquée.
P. WINTREBERT..	T Anatomie et histologie comparées.	P. JOB.....	Chimie générale.
L. BLARINGHEM..	T Botanique.	LABROUSTE....	Physique du Globe.
O. DUBOSCO....	T Biologie maritime.	PRENANT.....	Zoologie.
G. JULIA.....	T Application de l'analyse à la géométrie.	VILLEY.....	Mécanique physique et expérimentale.
C. MAUGUIN.....	T Minéralogie.	BOHN.....	Zoologie. P.C.B.
A. MICHEL-LÉVY..	Pétrographie.	COMBES.....	Botanique.
H. BÉNARD.....	T Mécanique expérimentale des fluides.	GARNIER.....	Calcul différentiel.
A. DENJOY.....	T Calcul différentiel et calcul intégral.	PÈRES.....	Mécanique des fluides.
L. LUTAUD.....	T Géographie physique et géologie dynamique.	HACKSPILL....	Chimie. P.C.B.
Eugène BLOCH..	T Physique théorique et physique céleste.	LAUGIER.....	Physiologie générale.
G. BRUHAT.....	Physique.	TOUSSAINT....	Technique Aéronautique.
E. DARMOIS....	Physique.	M. CURIE....	Physique. P.C.B.
		G. RIBAUD....	T Hautes températures.
		CHAZY.....	T Mécanique rationnelle.
		GAULT.....	Chimie. P.C.B.
		CROZE.....	Physique.
		DUPONT.....	T Théories chimiques.
		LANQUINE....	Géologie.
		VALIRON.....	Mathématiques générales.



Secrétaire..... A. PACAUD.
Secrétaire honoraire..... D. TOMBECK.

A MA MÈRE

A MON PÈRE



Digitized by the Internet Archive
in 2026

A Monsieur H. ABRAHAM
Directeur du Laboratoire de Physique
de l'Ecole Normale Supérieure

Hommage de profonde reconnaissance.

A Monsieur J. BAURAND

Amical homage.

MESURE DE PETITS COURANTS THERMO-ÉLECTRIQUES :

APPLICATION A L'ÉTUDE D'UN FAISCEAU
DE RAYONS INFRA-ROUGES
POLARISÉ ELLIPTIQUEMENT

INTRODUCTION

La détermination des constantes optiques d'un cristal, dans une zone de réflexion sélective, ne peut se faire que par les méthodes catoptriques : mesure du pouvoir réflecteur ou étude de l'état de polarisation de la lumière réfléchie. Cette dernière méthode pose le problème de l'analyse d'une vibration elliptique d'axes quelconques dans l'infra-rouge. C'est pourquoi je me suis proposé d'étudier un analyseur elliptique pour la région du spectre comprise entre 2 et 10μ dans laquelle se trouvent les zones de réflexion sélective de deux corps importants : le quartz et le spath.

Etant donné le grand nombre de réflexions que subit le faisceau dans le montage polarimétrique, les flux que l'on a à mesurer sont très faibles ; j'ai donc été amené à étudier d'abord un procédé de mesure de ces flux. J'ai utilisé, comme appareil récepteur, une pile thermo-électrique reliée à un galvanomètre dont les déviations sont amplifiées. Le zéro d'un tel ensemble est particulièrement instable. La première partie de ce travail a pour objet l'étude des causes de cette instabilité et des moyens d'obtenir un zéro stable.

Dans la seconde partie, j'ai étudié le montage polarimétrique et plus particulièrement l'analyseur dont les éléments principaux sont : un miroir de sélénium utilisé sous l'incidence brewstérienne et un quart d'onde constitué par un prisme de Fresnel en sel gemme. Ce montage a été appliqué à l'étude de la calcite pour la longueur d'onde $\lambda = 6,80\mu$.

PREMIÈRE PARTIE

MESURE DE PETITS COURANTS THERMO-ÉLECTRIQUES

L'étude qui suit a été faite en vue de l'application à un montage polarimétrique pour l'infra-rouge. C'est pourquoi j'ai utilisé une pile thermo-électrique de Moll, type micro, qui répond bien aux conditions exigées par ce montage (voir p. 53). Cette pile est reliée à un galvanomètre de Zernicke type Z_c . Pour les flux à mesurer, elle fournit des courants thermo-électriques compris entre 10^{-9} et 10^{-10} ampère, qui sont insuffisants pour faire dévier le galvanomètre de façon appréciable. Comme on sait mal amplifier directement les courants thermo-électriques, j'ai préféré réaliser un dispositif amplificateur des déviations du galvanomètre.

1. — Amplification des déviations d'un galvanomètre.

a) **Principe.** — L'amplification des déviations d'un galvanomètre a été réalisée pour la première fois en 1925 par Moll et Burger⁽¹⁾ à l'aide d'un thermo-relais; un dispositif à cellule photo-électrique m'a semblé plus simple.

Le miroir M (fig. 1) du galvanomètre primaire G_1 forme, dans un plan P , l'image F'_1 d'une fente verticale F_1 éclairée par la source S . Dans le plan P , un écran F_2 à bord vertical coupe l'image F'_1 et ne laisse passer qu'une partie du faisceau lumineux qui est reçue par la cellule C . Le courant photo-électrique ainsi produit est mesuré directement à l'aide du galvanomètre secondaire G_2 . Il est évident que toute rotation du miroir M se traduit par un déplacement de F'_1 qui entraîne

(1) MOLL et BURGER : *Phil. Mag.*, 50, 1925, p. 626.

une variation du flux reçu par la cellule; cette variation est mesurée par G_2 .

Un tel montage suffirait pour repérer une position déterminée du cadre du galvanomètre G_1 , dans le cas d'une méthode de zéro par exemple. Mais, si l'on veut mesurer des déviations, le flux que reçoit la cellule doit varier proportion-

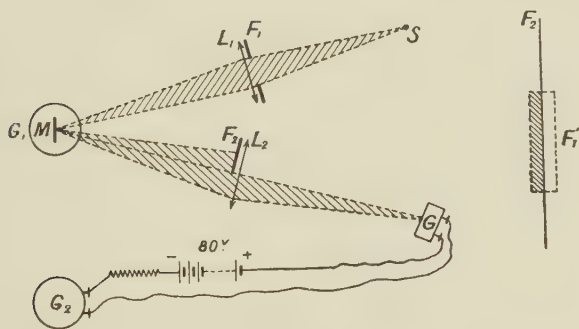


Fig. 1. — Schéma de l'amplificateur.

nellement à l'angle de rotation de M et engendrer un courant photo-électrique qui lui soit proportionnel. Il faut donc réaliser les conditions suivantes :

- 1° Flux émis par la lampe constant ;
- 2° Fente F_1 uniformément éclairée ;
- 3° Flux envoyé d'un point sur M identique pour tous les points de F_1 ;
- 4° Cellule utilisée dans des conditions telles que le courant photo-électrique soit proportionnel au flux reçu.

Une lampe de microprojection Philips, à filament ramassé ($2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$), alimentée par accumulateurs sous une tension inférieure à sa tension d'utilisation normale (4 ou 6 volts au lieu de 8), semble réaliser les deux premières conditions.

Pour réaliser la troisième condition, une lentille L_1 , placée

immédiatement après F_1 , forme l'image de la source sur le miroir M.

Une cellule à vide permet de remplir la quatrième condition : on sait en effet que, pour une cellule de ce type, le courant photo-électrique est, dans de larges limites, proportionnel au flux reçu et peu sensible aux faibles variations accidentelles de tension. Toutefois, il est bien connu que la sensibilité d'une cellule varie avec la partie de la couche sensible éclairée. Pour éliminer cet inconvénient, une lentille L_2 , placée immédiatement après l'écran F_2 , forme sur C l'image du miroir M. Dans ces conditions, lorsque le miroir tourne, son image reste fixe : seul l'éclairement de cette image varie. Le courant photo-électrique est mesuré directement à l'aide d'un galvanomètre sensible, facile à se procurer puisqu'il peut avoir un cadre de grande résistance.

Un inconvénient de ce montage est que le zéro de l'appareil correspond à une déviation permanente du galvanomètre secondaire. Il est facile d'imaginer des dispositifs de compensation : on peut en particulier utiliser deux cellules en opposition, alimentées en courant continu ou même en courant alternatif (fig. 2). La fente F_1 est alors séparée en deux

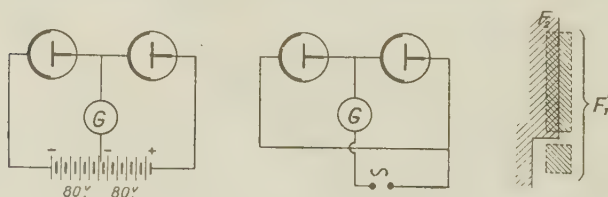


Fig. 2. — Montages compensateurs.

parties : comme précédemment, le faisceau supérieur est coupé par l'écran F_2 ; le faisceau inférieur, au contraire, passe intégralement à travers la lentille L_2 et, légèrement dévié par un prisme, tombe sur la seconde cellule, créant ainsi un courant thermo-électrique constant qui permet de faire coïncider les zéros des deux galvanomètres.

En réalité, les complications introduites par ces dispositifs m'ont conduit à les abandonner, d'autant plus que, dans le cas où l'appareil sert à mesurer des courants thermo-électriques toujours de même sens, on peut réduire la déviation permanente de G_2 à quelques centimètres si le dispositif est bien réglé.

b) **Discussion.** — J'appellerai coefficient d'amplification K le rapport des déviations angulaires des cadres des galvanomètres G_2 et G_1 . Si, pour une rotation α du miroir M , le flux reçu par la cellule varie de Φ , le coefficient d'amplification est de la forme $K = A \cdot \frac{\Phi}{\alpha}$. La quantité A est déterminée par la sensibilité de l'ensemble cellule-galvanomètre secondaire, qui doit être aussi grande que possible. La valeur de $\frac{\Phi}{\alpha}$ ne dépend que des constantes du système optique.

Il est évident que le miroir M est utilisé dans les conditions les meilleures, lorsque l'image de la source S dans la lentille L_1 recouvre exactement le miroir. On a alors, en négligeant les pertes par transmission et réflexion :

$$\frac{\Phi}{\alpha} = B \omega h \cdot \frac{1}{f} \frac{1}{\sqrt{\frac{\omega}{s}} + 1}$$

(B , brillance de la source; — s , surface de la source; — ω surface du miroir M ; — h , hauteur de la fente F ; — f , distance focale de L_1). La distance MF_1 est donnée par :

$$d = f \left(1 + \sqrt{\frac{\omega}{s}} \right)$$

L'expression de $\frac{\Phi}{\alpha}$ montre que K est d'autant plus grand que B , ω et s sont plus grands, ce qui était évident. Mais de plus on voit que $\frac{\Phi}{\alpha}$ ne dépend que du rapport $\frac{h}{f}$. L'ouverture de la lentille L_1 intervient donc seule pour limiter la valeur de

K. Pour les doublets achromatiques ordinaires, l'ouverture tolérable varie peu, et le choix de f est alors imposé par la nécessité d'avoir un dispositif ramassé sur une surface aussi petite que possible pour en favoriser la stabilité.

REMARQUE. — En général, les miroirs de galvanomètre sont plans, mais il suffit de placer une lentille L_3 immédiatement en avant pour se ramener au cas étudié.

c) **Réalisation.** — Les considérations précédentes m'ont conduit à utiliser les combinaisons suivantes, avec la source décrite plus haut :

Diamètre du miroir M	2 mm	8 mm
Distances focales de		
L_1	15 cm	10 cm
L_2	15 —	15 —
L_3	30 —	30 —
h maximum	4 —	4 —
d	37,5 —	50 —

Dans tous les cas, j'ai utilisé une cellule à vide Philips alimentée sous 80 volts et un galvanomètre Chauvin-Arnoux très sensible et d'emploi facile dont voici les caractéristiques. Sensibilité : $5 \cdot 10^{-10}$ ampère pour 1 mm à 1 m. Période : 9,5 sec. Résistance du cadre : 3.000 ohms. Résistance critique : 80.000 ohms environ.

Dans le cas du petit miroir, on ne peut guère dépasser $K = 100$ en poussant la lampe au maximum. Il est d'ailleurs préférable dans ce cas d'utiliser une lampe moins poussée et de remplacer F_1 et F_2 par un système de fentes parallèles. Un dispositif à 7 fentes m'a donné d'excellents résultats. Dans le second cas, on peut atteindre $K = 1\,000$. Pratiquement, à cause des fluctuations de zéro qui seront étudiées plus loin, on ne peut guère aller au delà de $K = 100$. C'est dans ces limites

que le dispositif a été étudié. Toutes les études ont été faites en enregistrant le spot du galvanomètre G_2 sur du papier photographique enroulé sur un cylindre entraîné par un mouvement d'horlogerie. Il était possible de réaliser les vitesses de déroulement suivantes : 30 et 10 cm à l'heure ; 5 cm à la minute ; 1 cm à la seconde.

d) **Stabilité.** — 1° **Miroir bloqué.** — Pour étudier la stabilité de l'amplificateur lui-même, on immobilise le miroir M. On obtient un enregistrement parfaitement rectiligne aux conditions suivantes :

1° Isolement parfait du circuit de la cellule ;

2° Courant dans la lampe bien constant.

La seconde condition est facile à réaliser en alimentant la lampe par un accumulateur sans rhéostat dans le circuit (le réglage de l'amplification se fait alors en agissant sur la hauteur de la fente). Toutefois, étant donné qu'une faible variation de courant entraîne une variation de flux notablement plus grande, la décharge de l'accumulateur se traduit par une dérive lente du spot. Cette dérive est assez faible lorsque la lampe est très sous-voltée : quelques millimètres à l'heure ; elle peut en outre être notablement réduite en maintenant l'accumulateur en charge avec un courant de charge légèrement inférieur au courant débité. Il n'en reste pas moins vrai que l'appareil n'est pas fidèle et ne peut servir qu'à faire des mesures relatives de courte durée : 1/2 heure à une heure par exemple. Pour obtenir un système fidèle, il faudrait réaliser la stabilisation parfaite du courant.

2° **Miroir libéré.** — Lorsque le cadre du galvanomètre est libre, on constate, même pour une amplification faible, que le spot est en perpétuelle agitation (fig. 3a). Ce phénomène est connu depuis longtemps ; on a d'abord accusé les micro-séismes de cette agitation, mais, en 1926, Ising ⁽¹⁾ a montré

(1) ISING : *Phil. Mag.*, **51**, 1926, p. 827.

qu'on pouvait l'expliquer, au moins partiellement, par la théorie des fluctuations. Dans le cas particulier étudié, il importait de démêler l'importance de l'influence de ces deux phénomènes sur le cadre du galvanomètre.

e) **Fidélité.** — Avant d'aborder l'étude des fluctuations, il faut signaler que ces phénomènes ne permettent pas de vérifier avec précision le fonctionnement correct de l'appareil, c'est-à-dire la proportionnalité des déviations du galvanomètre secondaire aux courants envoyés dans le galvanomètre primaire. Toutefois, il m'a paru indispensable de faire une vérification approximative. J'ai opéré avec le galvano-

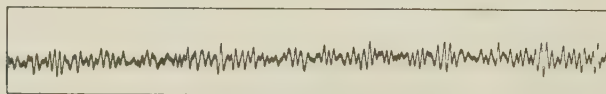


Fig. 3 a. — Fluctuations du spot.
 $k \simeq 150$. — Durée : 15 min.

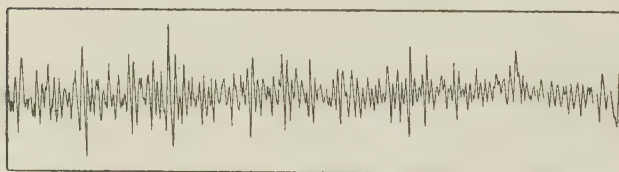


Fig. 3 b. — Mouvements du sol.
Durée : 15 min.

mètre Micro-Moll, pour lequel les réglages optiques sont les plus délicats, et les fluctuations de zéro assez faibles. J'ai obtenu les résultats suivants pour $K = 100$ environ :

Courant envoyé dans le galvanomètre primaire (en ampère)	Déviation du galvanomètre secondaire (en mm)	
	Mesurée	Calculée
$i_0 = 5/7,40^{-7}$	333	333
$1/2 i_0$	167	166,5
$1/3 i_0$	110	111
$1/4 i_0$	82	83

Les écarts sont de l'ordre de grandeur de l'amplitude des fluctuations.

II. — Étude des fluctuations du zéro.

a) **Recherches directes sur l'action des séismes.** — Le galvanomètre primaire et tout le dispositif amplificateur sont placés sur une table de marbre qui repose sur un pilier de maçonnerie scellé dans le sol d'une cave de l'Ecole normale. Il est facile de constater l'existence de faibles mouvements de cette table en observant la surface d'un bain de mercure; or, l'équipage d'un galvanomètre n'est jamais parfaitement symétrique et se comporte comme un sismographe; j'ai donc essayé de voir s'il y avait une corrélation entre les mouvements du sol et ceux du cadre du galvanomètre.

En décalant légèrement en avant le centre de gravité de l'équipage d'un galvanomètre Deprez G_3 , on réalise un appareil très sensible aux mouvements du sol et dont on peut régler la période à volonté par inclinaison du support. Son cadre, de grande surface et à grand nombre de tours de fil, est relié à un galvanomètre G_4 dont le cadre a, lui, une petite surface et peu de tours. Le spot de G_4 reproduit en les amplifiant les mouvements de l'équipage de G_3 . Bien entendu, ce galvanomètre G_3 est protégé des mouvements de l'air par une cloche étanche et calorifugée.

L'enregistrement du spot de G_4 présente un aspect qui rappelle l'enregistrement du spot de l'amplificateur (fig. 3 b), Toutefois, la comparaison des enregistrements simultanés des spots de G_4 et de G_2 , lorsque les galvanomètres G_3 et G_4 sont placés côte à côte sur la même table, ne donne aucun renseignement. Il en est de même si l'on enregistre les mouvements de deux galvanomètres identiques à l'aide de deux amplificateurs. Ces résultats négatifs ne prouvent rien, à mon sens, car

les équipages ne sont jamais identiques et un même séisme peut produire sur eux des effets très différents.

Dans ces conditions, il est nécessaire d'effectuer les mesures qui permettent la comparaison avec la théorie des fluctuations.

b) Etude statistique des fluctuations de zéro. —

Pour faire l'étude quantitative des mouvements rapides du cadre, le dispositif amplificateur décrit plus haut ne convient pas. En effet, si, à chaque instant, le courant photo-électrique i est proportionnel à la déviation α du cadre étudié, le cadre du galvanomètre G_2 ne suit les variations de i que si celles-ci sont lentes par rapport à sa période. Or, ce n'est pas le cas ici : les périodes de G_1 et de G_2 sont du même ordre.

Il m'a paru utile de réaliser un amplificateur qui puisse reproduire fidèlement les mouvements rapides d'un miroir M. La solution la plus simple serait de remplacer le galvanomètre secondaire par un oscillographe, mais les oscillographes ne sont pas assez sensibles et il faudrait d'abord amplifier le courant i .

1° DISPOSITIF ENREGISTREUR. — La solution adoptée fait appel au principe du rhéographe de M. H. Abraham : il faut amener l'équation du mouvement du cadre de G_2 :

$$I \frac{d^2}{dt^2} + F \frac{d\theta}{dt} + C\theta = A \alpha \quad (1)$$

à prendre la forme :

$$F \frac{d\theta}{dt} = B \frac{d\alpha}{dt} \quad (2)$$

On arrive à cette transformation de la façon suivante :

1° Le circuit de G_2 est choisi de telle façon que les termes en $\frac{d^2\theta}{dt^2}$ et θ soient négligeables devant le terme d'amortissement $F \frac{d\theta}{dt}$.

2° Le courant envoyé dans le cadre de G_2 est, non plus le courant photo-électrique i , mais un courant proportionnel à

$\frac{di}{dt}$, donc à $\frac{d\alpha}{dt}$, obtenu par l'intermédiaire d'un transformateur.

Ce montage est très souple, car le choix des caractéristiques du transformateur permet de régler à volonté la sensibilité. La réalisation m'a été facilitée par l'emploi d'un transformateur précédemment construit sur les données de M. Abraham ; ses caractéristiques sont les suivantes :

Primaire : 2 bobines portant 700 spires chacune ; résistance de chaque bobine : 6,5 ohms ;

Secondaire : 5 bobines portant chacune 50.000 spires environ.

Le montage est très simple : le secondaire du transformateur est placé dans le circuit de la cellule ; le primaire, peu résistant, est fermé sur un galvanomètre Zernicke Z_e à grande résistance critique (3.000 ohms) (fig. 4).

En réalité, l'équation (1) n'est réduite qu'approximative-

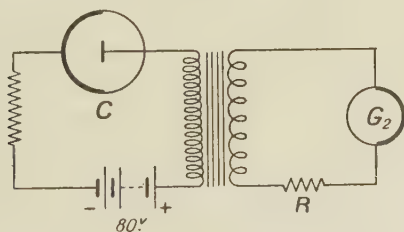


Fig. 4. — Schéma de l'amplificateur.

ment à la forme (2) et il est nécessaire de procéder à un réglage préliminaire. Pour faire ce réglage, on envoie sur la cellule un faisceau lumineux haché et on enregistre le spot de G_2 ; on agit alors sur le shunt magnétique de ce galvanomètre et au besoin sur une résistance R placée dans le circuit primaire, pour amener l'enregistrement à être correct.

Le dispositif ainsi réalisé permet de suivre des mouvements de fréquence 50 avec une amplification pouvant atteindre

200. La figure 5 *a* représente les mouvements du cadre d'un galvanomètre ayant une période de 0,2 sec. enregistrés à l'aide de ce dispositif. Dans les mêmes conditions, l'amplificateur utilisé initialement donne l'enregistrement reproduit

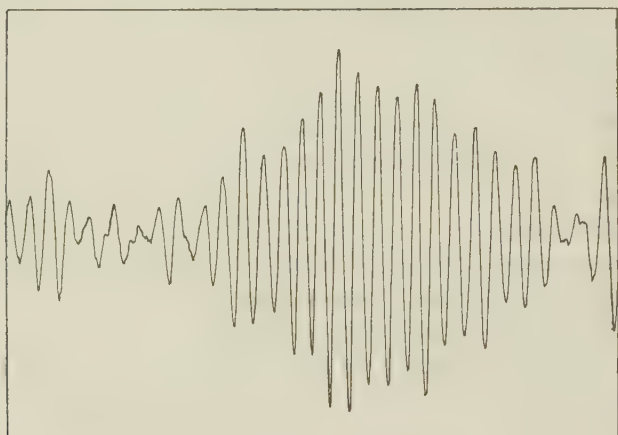


Fig. 5 *a*. — Durée : 8 sec.

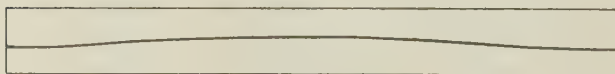


Fig. 5 *b*. — Durée : 8 sec.

Fig. 5 *a* et 5 *b*. — Spot de l'amplificateur.

par la figure 5 *b*. Il est important de remarquer qu'un tel montage est particulièrement sensible aux variations du champ magnétique environnant et il est bon de vérifier assez souvent la stabilité du zéro qui varie d'un jour à l'autre. Cet inconvénient limite la sensibilité, qu'on ne peut alors augmenter qu'en agissant sur le dispositif optique.

2° MOUVEMENTS DIVERS DU CADRE. — Le montage précédent appliqué à l'étude des mouvements du cadre du galvanomètre G_1 (Z_c) a permis de mettre en évidence trois sortes de mouvements (fig. 6 *a*):

I. — Mouvements permanents et désordonnés dont la durée est de l'ordre de la période du galvanomètre (7 sec. environ) ; ce sont les mouvements déjà signalés ;

II. — Oscillations régulières et peu amorties ; période 0,5 sec ;

III. — Oscillations régulières peu amorties ; période 0,1 sec.

En faisant tourner les fentes de l'amplificateur de manière

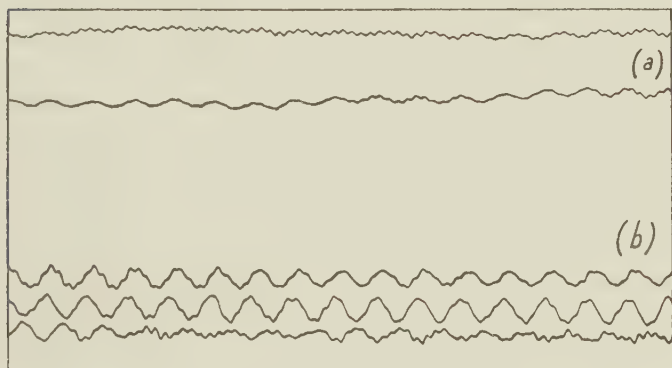


Fig. 6. — Mouvements divers du cadre.
Durée : 10 sec.

à les rendre horizontales, on constate que les mouvements I disparaissent presque intégralement alors que les mouvements II et III subsistent avec une amplitude du même ordre. (fig. 6*b*). Il résulte de là que les mouvements du type I sont des rotations normales du cadre. Les mouvements II et III sont, au contraire, des vibrations ; les deux périodes observées sont des périodes d'oscillations propres du cadre. Les oscillations des types II et III, qui sont certainement dues aux vibrations du sol, rendent impossibles les mesures relatives aux mouvements du premier type.

3° ESSAI D'ÉLIMINATION DE L'ACTION DES MOUVEMENTS DU SOL. —

J'ai d'abord opéré en plaçant le galvanomètre *seul* sur un support permettant de le soustraire à l'action des mouvements du sol. Ce support était du type en pendule ren-

versé analogue à celui décrit par Muller (1). Si un tel support présente l'inconvénient de ne pas éliminer les mouvements verticaux — négligeables en général — il possède les deux avantages suivants :

1° La hauteur du centre de gravité est indifférente ;

2° Le plateau portant le galvanomètre reste toujours parallèle à lui-même.

Dès que le galvanomètre est placé sur le support, les mouvements II et III disparaissent. Mais, si l'on bloque le miroir M, on constate que l'enregistrement présente des accidents. Ceci s'explique aisément : le dispositif optique ne forme plus un tout rigide, il constitue un sismographe. Dans ces conditions, il m'a semblé indispensable de placer non seulement le galvanomètre, mais toute la partie optique de l'amplificateur sur un même support.

Dans ce but, j'ai réalisé un amplificateur de petites dimensions dont toutes les pièces sont fixées sur un même bâti en duralumin ; en voici les caractéristiques : longueur, 60 cm ; largeur, 15 cm ; poids avec le galvanomètre, 8 kg ; distances focales des lentilles : L_1 , 6,5 cm ; L_2 , 10 cm ; L_3 , 20 cm (2).

Deux triangles équilatéraux en duralumin, de 50 cm de côté, reliés par trois colonnes de 12 cm de haut, constituent le support proprement dit. Trois tiges en laiton de 6 mm de diamètre et 52 cm de long en assurent la suspension ; chaque tige est encastrée à sa partie supérieure dans une des colonnes du support, à sa partie inférieure dans un pied à vis calantes qui facilite les réglages. Le dispositif amplificateur est fixé sur le triangle supérieur de façon que son centre de gravité soit sur la verticale du centre du triangle. Quatre bassins de 43 cm de diamètre et 12 mm de haut, contenant de l'huile de vaseline, sont empilés sur le triangle inférieur : ils consti-

(1) MULLER : *Ann. der Physik.*, **1**, 1929, p. 613.

(2) Ces caractéristiques ne correspondent pas exactement aux conditions optima fixées précédemment.

tuent le dispositif amortisseur. L'ensemble ne pèse pas 20 kg (fig. 7).

L'alimentation de la lampe se fait par l'intermédiaire de fils de cuivre amalgamés plongeant dans de larges godets de

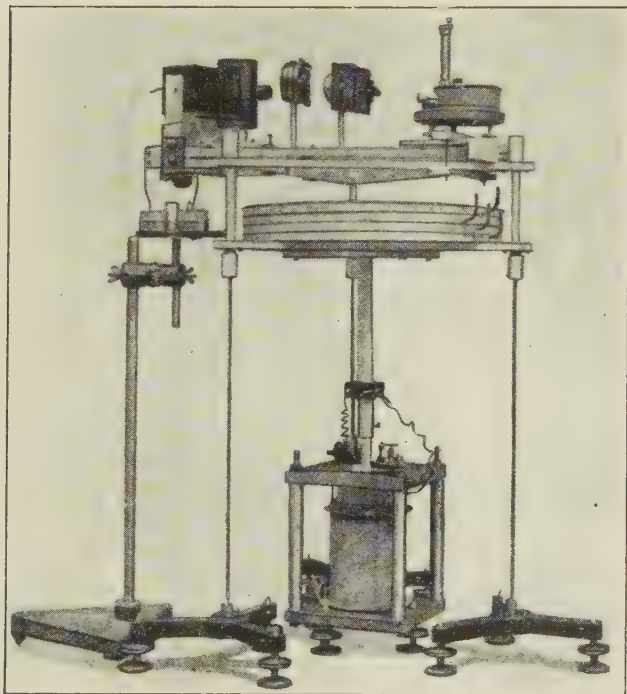


Fig. 7. — Support anti-vibration.

mercure. Les autres connexions (cellule, galvanomètre, etc...) sont faites à l'aide de fils de cuivre très fins enroulés en hélice.

Il est difficile de donner à un tel support une période dépassant 3 sec. à cause du flambage des tiges (1). Mais on

(1) J'ai essayé pour cette raison une suspension par fils; je n'ai pas obtenu de résultats satisfaisants.

admet en général que cette période est nettement supérieure aux périodes des vibrations du sol, qui sont de ce fait éliminées. Toutefois, pour être sûr que le galvanomètre était complètement protégé, il importait de pouvoir rendre la période

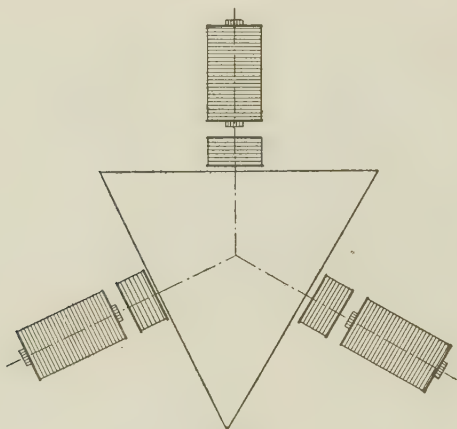


Fig. 8 a.

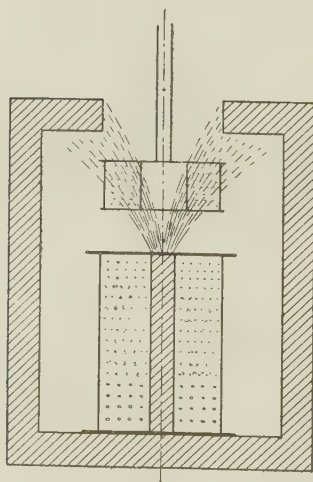


Fig. 8 b.

Fig. 8 a et 8 b. — Compensation électromagnétique.

du support supérieure à la période propre du galvanomètre. L'artifice suivant m'a permis d'obtenir ce résultat : un système de bobines fixé au support est soumis à l'action d'un champ magnétique lié au sol. Ce champ est tel que la position d'équilibre du support soit, pour le système de bobines, une position d'équilibre électromagnétique *instable* identique pour tous les azimuts. Dans ces conditions, pour un léger déplacement du support, la force élastique de rappel est partiellement compensée par une force de répulsion électromagnétique. La période est donc augmentée. On peut utiliser trois bobines fixées aux trois côtés du triangle support et soumises chacune à l'action d'une bobine fixe (fig. 8a). Le réglage de ce dispositif devient très délicat dès que la période est un peu grande. J'ai obtenu de meilleurs résultats en utilisant une seule bobine dont l'axe vertical coïncide avec celui du support et qui est soumise à l'action d'un champ créé par une bobine fixe à axe vertical. A l'équilibre, les deux axes coïncident et le système présente bien une symétrie de révolution (fig. 8b). Dans ce montage, il faut remarquer qu'il existe en permanence une force de répulsion verticale qui se retranche de la force de pesanteur et tendrait par suite à diminuer la période si elle ne restait pas négligeable devant le poids du support.

En principe, en agissant sur l'intensité du courant qui traverse les bobines et sur leur écartement, on peut amener la compensation à être presque totale et faire croître indéfiniment la période. Pratiquement, lorsque la période augmente l'amortissement devient considérable et, au delà de 10 à 12 sec., elle n'est plus mesurable.

4° RÉSULTATS. — L'étude statistique porte sur le carré moyen de la déviation. Pour un galvanomètre dont l'équation est :

$$I\theta'' + \left(f + \frac{\Phi_0^2}{r}\right)\theta' + C\theta = \Phi_0 i$$

le carré moyen $\overline{\theta^2}$ du déplacement de zéro dû aux mouvements browniens est donné par la formule (1) :

$$\overline{\theta^2} = \frac{kT}{C} \quad (3)$$

quel que soit l'amortissement.

Il est commode de considérer le courant i_0 qui produirait la déviation $\theta_0 = \sqrt{\overline{\theta^2}}$. Ce courant i_0 peut s'exprimer en fonction de la période τ du galvanomètre en circuit ouvert et de la résistance critique R . Si l'amortissement est complètement électrique, on a (2) :

$$i_0 = \sqrt{\pi kT} \cdot \sqrt{\frac{1}{R\tau}}$$

ou à la température ordinaire :

$$i_0 = 1,12 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{1}{\sqrt{R\tau}} \text{ amp.} \quad (4)$$

Lorsque f n'est pas négligeable devant $\frac{\Phi_0^2}{R}$, il faut introduire un terme correctif qui peut se calculer à partir du décrement logarithmique δ du mouvement du cadre en circuit ouvert. On a, avec une approximation suffisante :

$$i_0 = 1,12 \cdot 10^{-10} \frac{1}{\sqrt{R\tau}} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\delta^2}{2\pi}}} \text{ amp.} \quad (5)$$

Les vérifications expérimentales directes de la formule (4) par l'emploi d'un amplificateur sont peu nombreuses, et les auteurs semblent oublier que le spot de l'amplificateur ne suit les mouvements du cadre que dans certaines conditions (2) (3). Ornstein (4) a tourné la difficulté en faisant une étude sur l'influence de la température (5).

(1) Voir par exemple : VAN LEAR : *Rev. of scient. Instr.*, **4**, 1933, p. 21.

(2) ISING, *loc. cit.*

(3) MATOSI et BOWLING BARNES : *Z. Fur Physik*, **76**, 1932, p. 24.

(4) ORNSTEIN, BURGER, etc. : *Proc. roy. Soc.*, London, **65**, 1927, p. 391.

(5) D'autres méthodes ont permis l'étude des fluctuations des galvanomètres : Phénomènes d'interférences ISING : *Ann. der Physik.*, **14**, 1932, p. 779. — Radiomètre à résonance : Voir VAN LEAR, *loc. cit.*

J'ai appliqué la méthode d'enregistrement décrite plus haut à deux galvanomètres de types différents.

a) Galvanomètre Micro-Moll.

Période.....	0,24 sec.
Résistance du cadre.....	20,4 ohms.
Résistance critique.....	40 ohms.
i_0 Théorique.	$0,36 \cdot 10^{-10}$ amp.

	Nombre de mesures	Intervalle entre les pointés	i_0 mesuré en 10^{-10} amp.
a) Galvanomètre posé sur la table..	190	1 sec.	0,78
b) Galvanomètre seul sur support (pé- riode, 2 sec.)....	100	1 sec.	0,50
c) Tout l'amplifica- teur sur le support.	{ 300 740	{ 0,5 sec. 0,1 sec.	{ 0,37 0,355 Moyenne 0,363

Toutes les mesures ont été faites pour le galvanomètre à l'amortissement critique.

β) Galvanomètre Zernicke, type Z :

Période... 6,3 sec. (Circuit ouvert).
Décrément en circuit ouvert $\delta = 1,5$.
Résistance du cadre..... 25 ohms.
Résistance critique..... 75 ohms.

Les mesures sont faites pour le galvanomètre en circuit ouvert, tout l'amplificateur étant placé sur le support.

Période du support	Nombre de pointés	Intervalle entre les pointés	i_0 en 10^{-11} amp.
2 sec.	300	0,1 sec.	0,59
2 —	200	1 —	0,57
8 sec. environ	583	0,1 —	0,56
8 — —	197	1 —	0,58
Valeur théorique.....			0,595

5° PRÉCISION. — La précision avec laquelle on peut comparer les différentes valeurs de i_0 dépend surtout de la précision avec laquelle on peut déterminer les quantités qui interviennent dans le calcul de i_0 . Le calcul de i_0 , à partir des mesures faites sur les enregistrements, nécessite la connaissance de la sensibilité de l'amplificateur (produit de la sensibilité du galvanomètre G_1 par le coefficient K); celle-ci se détermine directement en envoyant dans le galvanomètre un courant connu. La mesure de la déviation d'un spot en perpétuelle agitation ne peut être précise, et il serait illusoire d'essayer d'augmenter la précision en produisant une très grande déviation : ceci supposerait en effet une constance parfaite de l'amplificateur (1). D'autre part, il est assez délicat de produire un courant connu très faible de l'ordre de 10^{-10} amp (fuites, f. é. m. de contact, etc.). Enfin, la détermination de la valeur théorique de i_0 par la formule (5) fait intervenir la période et la résistance critique : il est difficile de connaître cette dernière avec grande précision.

Il résulte de là que la précision des nombres obtenus est de l'ordre de 5 à 10 %, plus faible dans le second cas où le galvanomètre est d'un emploi beaucoup plus délicat.

REMARQUE. — Dans le cas du galvanomètre Z_c , j'ai montré que les mesures sur le galvanomètre non protégé étaient impossibles (p. 13). Pour avoir cependant un élément de comparaison, j'ai effectué des mesures sur un enregistrement obtenu avec l'amplificateur décrit initialement et, pour passer de la valeur trouvée à la valeur réelle de $\bar{\theta}^2$, j'ai appliqué les résultats de la théorie des fluctuations transmises donnés par Courtines (2). 195 pointés ont donné :

i non corrigé.....	$0,56 \cdot 10^{-11}$ amp.
i corrigé.....	$0,80 \cdot 10^{-11}$ amp.

(1) Ce procédé a l'avantage de permettre la mesure de la sensibilité immédiatement avant et immédiatement après l'enregistrement étudié, sans aucune modification du dispositif ; il n'en serait pas de même pour la mesure de K .

(2) COURTINES : Congrès International d'Electricité, 1932. Section 1, rapport 34.

Conclusion. — La concordance entre les résultats des mesures et les prévisions théoriques, lorsqu'on utilise le support pour deux galvanomètres bien différents, montre l'efficacité de ce dernier pour la protection contre les mouvements du sol.

Les mesures montrent aussi que les fluctuations du spot restent du même ordre de grandeur lorsqu'on élimine l'action des séismes ; la sensibilité du dispositif n'est pas sensiblement augmentée. Il faut donc aborder le problème autrement.

III. — Suppression des fluctuations du zéro du galvanomètre secondaire.

Pour un coefficient d'amplification donné K , la sensibilité d'un dispositif amplificateur dépend du carré moyen $\bar{\theta}^2$ des fluctuations de zéro du galvanomètre secondaire : on admet qu'une déviation θ n'est mesurable que si $\theta > \gamma\theta_0$ ($\theta_0 = \sqrt{\bar{\theta}^2}$), le coefficient γ étant un coefficient de sécurité qui dépend du nombre de mesures que l'on peut faire pour une même dévia-

tion. En général, le rapport $k = \sqrt{\frac{\bar{\theta}^2}{\alpha^2}}$ relatif aux carrés

moyens des fluctuations des cadres de G_2 et de G_4 , n'est pas égal à K et l'amplificateur est d'autant plus sensible que le rapport k/K est plus petit. Mais, la théorie⁽¹⁾ prévoit que ce rapport ne peut être petit que si le temps de réponse⁽²⁾ de l'ensemble constitué par les deux galvanomètres couplés est grand. Le gain de sensibilité ne peut donc s'obtenir qu'aux dépens de la rapidité des mesures.

(1) VAN LEAR, *loc. cit.*

ISING : *Ann. der Physik.*, **8**, 1931, p. 905.

(2) Dans ce qui suit, les mouvements du spot suivent toujours, en première approximation, une loi exponentielle : je donnerai de préférence la valeur de la constante de temps t . On passe facilement de cette valeur à celle du temps de réponse.

Le point de vue pratique est totalement différent, et il est bien des cas où il est plus commode de travailler avec un spot stable que de répéter plusieurs mesures sur un spot en perpétuelle agitation. Il m'a donc paru intéressant d'étudier, d'un point de vue purement expérimental, les deux points suivants :

1° Avec les valeurs de K couramment employées (100 à 200), pour quelle constante de temps t le spot est-il pratiquement stable ?

2° Pour cette valeur de t , l'amplificateur est-il fidèle ? On peut craindre, en effet, que, pour de grandes valeurs de t , le zéro de l'appareil soit mal défini.

Le galvanomètre primaire étant donné, on peut augmenter la constante de temps en agissant soit sur les caractéristiques du galvanomètre G_2 , soit sur celles du circuit de la cellule, soit sur les deux à la fois.

Le procédé le plus simple consiste évidemment à choisir un galvanomètre à grande période ; mais, si ce procédé est utilisable pour un galvanomètre G_1 de courte période (voir figure 5 — rapport des périodes : 50 environ), il est difficile à employer lorsque le galvanomètre primaire a une période de plusieurs secondes (6,3 sec. dans le cas étudié). J'ai surtout étudié les divers procédés réalisables avec les appareils courants dont je disposais.

a) **Emploi d'un galvanomètre apériodique.** — On peut donner à la constante de temps du dispositif une valeur notable en employant un galvanomètre secondaire G_2 rendu fortement apériodique par un shunt S . Le galvanomètre Z_0 utilisé déjà dans le montage en rhéographe (voir p. 10) se prête particulièrement à cet usage ; sa résistance est de 25 ohms et un shunt de 50 ohms suffit pour donner à son mouvement une constante de temps de une minute. On réduit donc sa sensibilité de $1/3$, mais, dans ces conditions, il est encore plus sensible que le galvanomètre employé normalement.

J'ai d'abord vérifié que, pour une telle constante de temps, le zéro est encore bien défini : la cellule ne recevant aucun flux, on inscrit pendant le premier tour du cylindre enregistreur (1 heure) le zéro de l'appareil, puis, durant le second tour, on envoie à plusieurs reprises pendant 5 min. un flux lumineux sur la cellule. Le zéro s'est montré parfaitement stable et les retours au zéro toujours corrects.

J'ai étudié ensuite ce qui se passe lorsque la lampe de l'amplificateur est allumée pour deux valeurs de K : $K = 150$ et $K = 70$. Lorsque $K = 150$, pour $t = 0,5$ min. ($S = 150$) on obtient déjà une amélioration très nette, les déplacements maxima du zéro sont ramenés de 4 à 0,2 mm. Il faut des cendre jusque $t = 1$ min. ($S = 50$) pour obtenir un spot pratiquement stable. On observe toutefois encore quelques petites oscillations qui ne sont pas gênantes pour les mesures. La figure 9 représente deux enregistrements d'une même dévia-

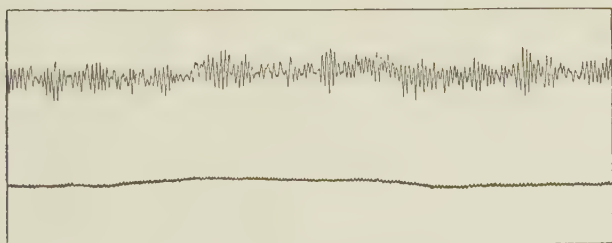


Fig. 9. — Suppression des fluctuations.

tion du galvanomètre primaire faits l'un avec le galvanomètre G_2 à l'amortissement critique, l'autre avec ce galvanomètre shunté par 50 ohms.

Pour $K = 70$, on obtient pour $t = 0,5$ min. le même résultat que pour $t = 1$ min. dans le cas précédent ; pour $t = 0,7$ min., ($S = 100$) les oscillations deviennent à peine visibles et, pour $t = 1$ min., le spot est parfaitement stable.

Le galvanomètre Chauvin-Arnoux de 3.000 ohms de résistance donne des résultats analogues, mais, pour un shunt de

3.000 ohms, la constante de temps n'est que de 0,4 min.; la perte de sensibilité est trop grande. J'indiquerai plus loin le moyen employé pour tourner cette difficulté.

b) **Emploi d'une cellule shuntée par un condensateur.** — Le procédé précédent donne de bons résultats, mais il a le grave inconvénient de ne pas utiliser le galvanomètre G_2 avec sa sensibilité maximum. On peut augmenter la constante de temps du système, sans modifier la sensibilité, en agissant sur la constante de temps du circuit de la cellule lui-même. Etant donné sa grande résistance, on ne peut songer à utiliser une self; il faut placer un condensateur C aux bornes de la cellule. La constante de temps est alors, en première approximation, égale au produit CR . (C , capacité du condensateur — R , somme de la résistance de protection et de la résistance du galvanomètre). Toutefois, il est nécessaire d'éviter que la tension soit appliquée en perma-

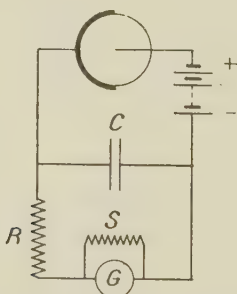


Fig. 10. — Schéma du montage.

nence aux bornes de C et que le courant de fuite de ce condensateur traverse le galvanomètre. Le montage utilisé est donc celui représenté par la figure 10; la résistance de fuite ρ du condensateur, n'intervient plus que pour réduire légèrement la sensibilité en dérivant une partie du courant photo-électrique. Suivant les condensateurs dont on dispose, il faut choi-

sir R et C de façon que R reste petit devant ρ et ne crée pas, lorsque la cellule débite, une baisse de tension notable. Pratiquement, j'ai utilisé des résistances R variant entre 100 et 500 mégohms et des capacités comprises entre 0,1 et 0,5 microfarad. Les résultats concordent avec ceux obtenus par la méthode précédente.

c) **Combinaison des deux procédés.** — Si l'on utilise à la fois un condensateur et un galvanomètre apériodique, on peut espérer obtenir un meilleur résultat sans augmenter le temps de réponse, et même réduire la valeur de la constante de temps minimum nécessaire pour obtenir un spot stable. J'ai effectivement vérifié, en reprenant les essais faits avec le galvanomètre Z_e pour $K = 150$, qu'on fait totalement disparaître les petites oscillations qui subsistaient en adjoignant au montage un condensateur de 0,01 microfarad associé à une résistance de 500 mégohms.

Mais j'ai constaté d'autre part que, si l'on veut un spot parfaitement stable, on ne peut guère réduire la constante de temps. En effet, si, pour une constante de temps de 0,3 min. (avec $K = 150$), par exemple, les oscillations de courte durée disparaissent déjà, il subsiste cependant des oscillations plus lentes de faible amplitude (durée supérieure à 1 min.). Ces résultats ont été vérifiés par l'expérience décrite ci-dessous, qui constitue une méthode d'élimination des fluctuations totalement différente des précédentes.

d) **Essai de compensation des fluctuations du flux reçu par la cellule.** — Au lieu d'agir sur les constantes électriques du circuit de la cellule, on peut essayer de donner aux variations du flux reçu par la cellule une constante de temps notable. A cet effet, j'ai modifié le montage de l'amplificateur de la manière suivante : l'écran F_2 est disposé comme l'indique la figure 11. Le faisceau lumineux issu du miroir de G_1 est séparé en deux ; le faisceau qui traverse la

fente a va tomber sur la cellule C_1 de l'amplificateur normal ; celui qui traverse la fente b est envoyé, à l'aide d'un prisme à réflexion totale, sur une cellule auxiliaire C_2 qui fait partie d'un amplificateur monté en rhéographe (Voir p. 10). Le miroir du galvanomètre G_3 de cet amplificateur forme, de la

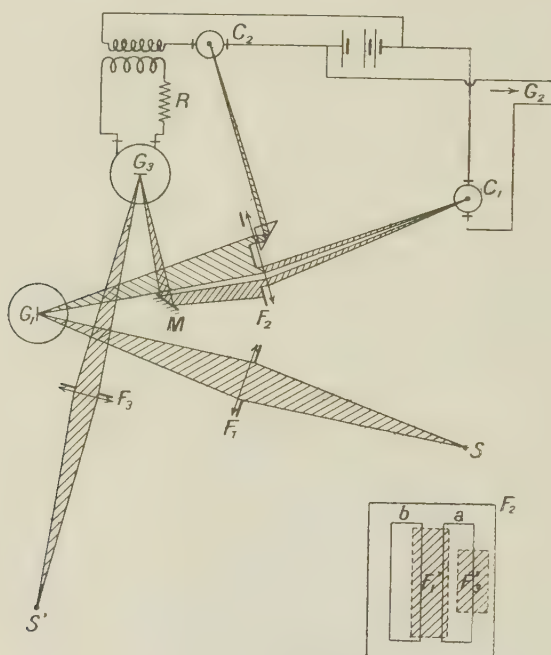


Fig. 11. — Marche des rayons.

fente auxiliaire F_3 , une image F'_3 sur l'écran F_2 , et le flux que laisse passer cet écran va tomber sur la cellule C_1 . Comme le galvanomètre G_3 ne fonctionne pas en fluxmètre parfait, on peut régler R de façon que, pour tout déplacement e de F'_1 , l'image F'_3 se déplace dans le même sens, de ne , mais revienne à sa position initiale au bout d'un temps de l'ordre de la minute. Dans ces conditions, si le rapport des éclairagements de F'_1 et de F'_3 est convenablement choisi, pour des oscillations

rapides du cadre de G_1 , le flux qui reçoit la cellule C_1 reste constant, mais une déviation permanente se traduit, lorsque F'_3 est revenue à sa disposition initiale, par une variation du flux total égale à celle qui se produit dans l'amplificateur normal. L'éclairement de F'_3 doit être assez faible pour que les variations de flux dues aux fluctuations du zéro de G_3 n'interviennent pas.

Les expériences ont été faites pour $K = 100$, la fente auxiliaire étant réglée pour que le spot soit stable lorsque le galvanomètre G_3 est seul éclairé. Dans ces conditions, n devait être pris égal à 150 environ.

On obtient des résultats analogues à ceux que donne le montage étudié au paragraphe *c* : pour la même valeur de K , la valeur minimum de la constante de temps nécessaire pour éliminer les oscillations rapides du spot est plus faible que pour les montages *a* et *b*, mais les oscillations lentes ne permettent pas de profiter de cet avantage.

Ce montage ⁽¹⁾, d'un emploi peu pratique à cause de son réglage délicat, me paraît cependant intéressant, car le fait qu'il permet une compensation prouve le fonctionnement correct des deux amplificateurs employés ici simultanément.

Conclusion. — Les études précédentes montrent que, par une modification facile du circuit de l'amplificateur, on peut améliorer beaucoup la stabilité du spot pour des temps de réponse acceptables dans bien des cas (2 à 4 min.). J'ai été conduit à adopter un montage mixte permettant l'emploi du galvanomètre Chauvin-Arnoux sans trop réduire sa sensibilité. Les constantes du circuit sont les suivantes : $R = 100$ mé-

(1) On peut simplifier considérablement le montage en utilisant une seule source : un prisme de très petit angle convenablement placé renvoie sur G_3 une partie de la lumière issue de F_1 . Pour la commodité des réglages, j'ai abandonné cette solution. On peut aussi n'utiliser qu'une cellule : le primaire du transformateur est alors en série avec G_2 . Mais alors, ou bien la position d'équilibre de G_3 est instable et il s'établit des oscillations de relaxation à longue période, ou bien G_3 s'oppose à ses propres mouvements et n est considérablement réduit.

gohms — $S = 50.000$ ohms. C varie de 0,1 à 0,3 microfarad suivant les valeurs de K . La figure 12 représente un enregistrement fait pour $K = 55$ avec $C = 0,3$ microfarad.

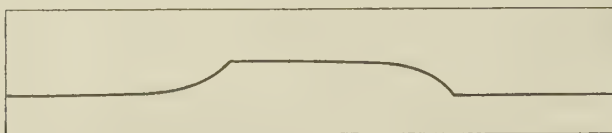


Fig. 12. — Suppression des fluctuations.

IV. — Fidélité de l'amplificateur.

Le montage décrit dans le paragraphe précédent permet évidemment de vérifier avec précision la fidélité de l'amplificateur. Cette opération est toutefois assez délicate, et, comme au cours des mesures polarimétriques on est toujours amené à comparer des déviations très peu différentes, je me suis borné à vérifier la fidélité de l'amplificateur pour la région corres-

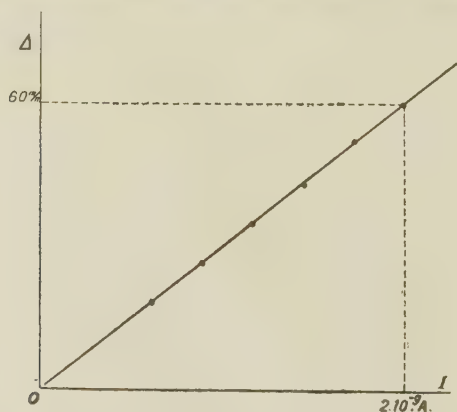


Fig. 13. — Fidélité de l'amplificateur.

pondant aux conditions d'emploi (fig. 13). Cette opération permet en outre la détermination du coefficient d'amplification.

Comme je l'ai déjà indiqué, la fidélité dans le temps n'existe pas ; au cours d'une mesure le coefficient K diminue constamment : pour une lampe peu poussée, K diminue de $1/100$ de sa valeur en 60 min. On peut d'ailleurs vérifier fréquemment la valeur de K de la façon suivante : on utilise un système de fentes analogue à celui qui est représenté sur la figure 2 ; un obturateur permet de ne démasquer qu'une des deux parties de la fente F_1 . La partie supérieure sert aux mesures ; la partie inférieure produit, lorsqu'elle est démasquée seule, une déviation du galvanomètre G_2 proportionnelle à K .

V. — Etude de la pile : influence des variations de pression atmosphérique ⁽¹⁾.

La pile utilisée est une pile de Moll dans l'air (type Micro) : elle comporte 18 soudures réparties dans un cercle de 6 mm. de diamètre. Sa résistance est de 30 ohms. Lorsqu'on relie cette pile aux bornes du galvanomètre G_1 muni de son dispositif amplificateur, l'enregistrement du spot montre qu'aux fluctuations qui viennent d'être étudiées se superposent : 1° une agitation rapide et permanente ; 2° des déplacements lents du zéro moyen. Exceptionnellement, l'amplitude des mouvements rapides atteint plusieurs centimètres, mais elle est en général de quelques millimètres alors que, pour une même amplification, l'amplitude des fluctuations dues aux mouvements browniens est d'une fraction de millimètre. Les déplacements lents du zéro moyen peuvent atteindre plusieurs centimètres (fig. 14). Toutes ces déviations sont dues évidemment à des courants qui prennent naissance dans le circuit de

(1) Cette étude a été faite avant celle sur l'élimination des fluctuations. Mais le coefficient K était tel que ces fluctuations soient assez petites pour ne pas masquer le phénomène principal.

la pile à cause de la présence de celle-ci. On a souvent constaté qu'un tel circuit est capable de détecter des oscillations électriques, mais la permanence du phénomène observé ne permet pas qu'on s'arrête à cette hypothèse. Il faut admettre des

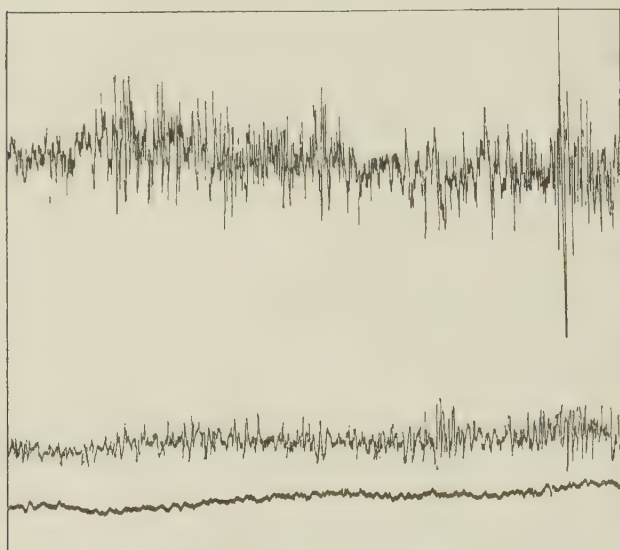


Fig. 14. — Effet de la pression atmosphérique
Durée : 50 min. — Intervalle entre les enregistrements : 3 h.

différences de températures entre les soudures de la pile, et on peut supposer que les évolutions adiabatiques de l'air, dues aux variations de la pression atmosphérique, créent ces écarts de températures : les soudures constituant la surface réceptrice ayant une capacité calorifique beaucoup plus faible que les autres soudures qui font corps avec la masse de la monture.

M. H. Abraham ⁽¹⁾ a montré de façon saisissante l'influence de ces variations de pression sur un thermomètre à résistance. Il est facile, d'autre part, de constater que les piles thermo-

(1) H. ABRAHAM : *Journal de Physique*, **3**, 1932, p. 160 s.

électriques sont sensibles aux variations de pression artificielles (ouverture d'une porte par exemple), et plusieurs auteurs⁽¹⁾ ont déjà signalé que le mauvais temps gênait leurs mesures. J'ai cru utile d'étudier à fond le phénomène en enregistrant simultanément le spot de l'amplificateur et les variations de la pression atmosphérique.

Le baromètre différentiel employé pour cette étude est celui qui avait servi à M. Abraham. Cinq boîtes barométriques cannelées, ouvertes, sont disposées, comme l'indique la figure 15,

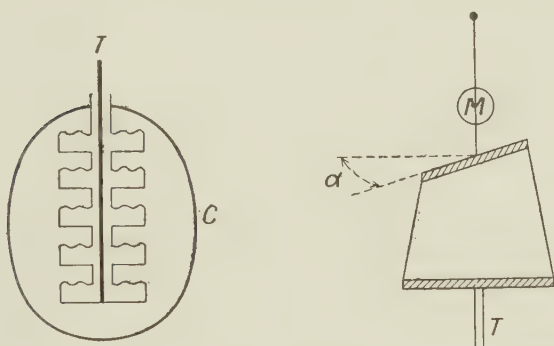


Fig. 15. — Dispositif barométrique.

à l'intérieur d'un cylindre relié à l'extérieur par une fuite réglable qui permet de faire varier la constante de temps de l'appareil. Les déplacements linéaires de la tige T sont transformés en mouvements de rotation d'un miroir par une transmission trifilaire. La sensibilité de ce dispositif est de 1 mm à 1 m pour une variation de pression de 0,002 mm de mercure.

Lorsque la constante de temps est de l'ordre de la minute, on n'enregistre que les variations rapides de pression, et la courbe obtenue est parfaitement semblable à celle décrite par

(1) LECOMTE et LAMBERG : Publications scientifiques du Ministère de l'air ,n° 34.

le spot de l'amplificateur (abstraction faite des déplacements lents du zéro) (fig. 16). Il est facile de vérifier ces résultats en enfermant la pile dans une enceinte de verre scellée : l'agitation du spot disparaît, les fluctuations subsistent seules

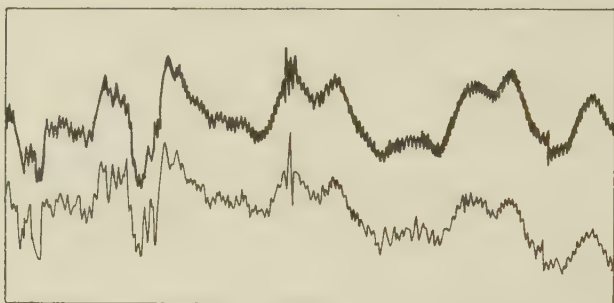


Fig. 16.— Comparaison des variations de pression atmosphérique (en haut) et des déplacements du zéro (en bas).
Durée : 15 min.

(fig. 17). Un calcul approximatif permet, en admettant l'hypothèse des variations adiabatiques de pression, de comparer les variations de température de l'air à l'écart de tempéra-

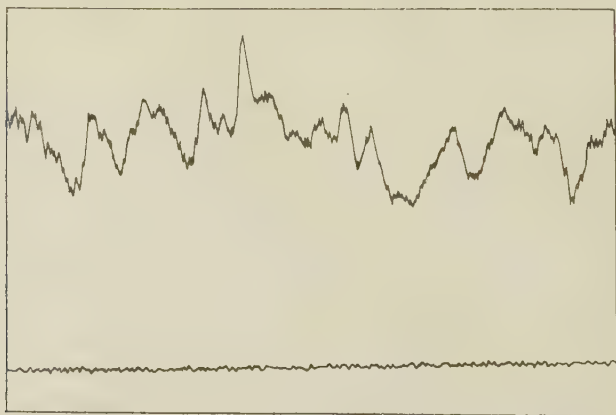


Fig. 17. — Suppression des effets de la pression atmosphérique.
Durée : 15 min.

ture entre les soudures de la pile : on trouve que celui-ci n'est que le $1/100$ environ de la variation de température de l'air :

mais il est quand même remarquable que, dans un espace de quelques millimètres de côté, au sein d'une masse métallique, on puisse enregistrer de telles variations.

Lorsque cette agitation rapide est faible, on peut enregistrer les variations lentes de pression (constante de temps de 15 min.) et étudier l'aspect du point moyen de la courbe. Il semble que la courbe représentant le point moyen du spo soit très voisine de la dérivée de la courbe des pressions. Ceci peut s'expliquer de la façon suivante : pour une variation lente et régulière de la pression, la pile prend rapidement une température d'équilibre qui dépend seulement de la vitesse de cette variation.

De ce fait, lorsque la pile est placée dans une enceinte close, elle est très sensible aux variations de pression de l'air enfermé dans l'enceinte, et par suite aux variations de température des parois : c'est ce que j'ai pu constater lorsque la pile était placée dans un simple tube de verre scellé. J'ai remarqué d'autre part qu'une fuite, assez petite pour que l'influence des variations rapides de pression ne soit plus sensible, permet cependant les échanges lents de gaz entre l'extérieur et l'intérieur et, par suite, des modifications de pression intérieure sensibles. L'étanchéité doit donc être excellente.

Conclusion. — Il résulte de ces expériences que les divers mouvements observés ont pour seule cause les variations de pression atmosphérique. L'emploi d'une pile dans le vide est la solution idéale pour éliminer complètement les phénomènes qui viennent d'être étudiés. Toutefois, les fenêtres de sel gemme ou de fluorine, indispensables pour les longueurs d'ondes supérieures à quelques microns, ne permettent pas un vide permanent, et la pile doit rester en relation avec une pompe. Cet inconvénient m'a conduit à étudier les possibilités d'emploi d'une pile de Moll.

Les conditions à réaliser sont les suivantes :

1° La pile doit être placée dans une enceinte étanche ;

2^o Cette enceinte doit être aussi peu sensible que possible aux variations de température de l'air ambiant.

J'ai obtenu de bons résultats en plaçant la pile dans un canon de cuivre rouge enfermé dans une enceinte en laiton épais (6 mm) dont la fermeture est assurée par un joint de caoutchouc graissé et fortement comprimé. On vérifie facilement si l'étanchéité est suffisante : même lorsque la fuite est assez faible pour que l'amplitude des fluctuations ne semble pas augmentée par les effets de pression, l'aspect de l'enregistrement est nettement différent. Le rayonnement pénètre dans l'enceinte à travers une fenêtre scellée à la cire. Ce scellement qui ne permet pas de maintenir un vide permanent s'est montré suffisamment étanche.

J'ai réalisé deux dispositifs de ce type :

a) Dans le premier, l'enceinte est constituée par un simple tube de laiton fermé à une extrémité par la fenêtre transparente et à l'autre par un bouchon de laiton traversé par les fils de connexion. Ce dispositif présente l'inconvénient de nécessiter un démontage complet chaque fois qu'il faut changer la fenêtre (ce qui est fréquent pour les fenêtres de sel gemme), aussi je ne l'ai utilisé que très rarement.

b) Dans le second, l'enceinte est constituée par une plate-forme rectangulaire sur laquelle vient s'appliquer un couvercle parallélépipédique. La plate-forme fait corps avec le reste de l'appareil et porte la pile et les deux miroirs qui la précèdent (voir p. 54); la fenêtre est fixée au couvercle. Ce couvercle est mis en place une fois tous les réglages faits, et le changement de fenêtre peut s'effectuer sans modifier ces réglages.

REMARQUES. — I. — Une solution plus simple consisterait à utiliser deux piles identiques montées en opposition, une seule des piles recevant le flux à mesurer. La sensibilité serait évidemment légèrement diminuée. Cette solution semble être réalisée par les piles compensées utilisées déjà par certains

auteurs pour d'autres raisons. Je n'ai pu me procurer une de ces piles pour en faire l'étude.

II. — Etant donné que les déplacements lents sont les plus difficiles à éliminer, l'emploi d'un amplificateur à grande constante de temps ne procure aucun avantage.

VI. — Étude de la stabilité du zéro moyen.

Jusqu'ici, j'ai surtout considéré les déplacements rapides et désordonnés du spot. Je vais maintenant étudier les conditions de stabilité du point moyen de l'enregistrement. Les courants se déterminant par la mesure des déplacements de ce point moyen, il importe en effet que la courbe décrite par celui-ci se rapproche le plus possible d'une droite. On se trouve, pour cette étude, dans un cas où l'emploi d'un amplificateur à grande constante de temps est particulièrement favorable.

Les études précédentes ont été faites par enregistrement dans une cave fermée, en l'absence de l'opérateur, mais il est facile de constater que le seul fait d'ouvrir la porte, ou de séjourner quelques instants dans la salle, introduit une perturbation qui se traduit par un lent déplacement du zéro moyen avec retour à la position initiale au bout d'un temps qui est de l'ordre de la demi-heure. Une étude systématique a montré que, si la pile est la cause de la plus grande part de ces déplacements, le galvanomètre et même la lampe et la cellule en sont eux aussi responsables. Pour une même perturbation dans la salle, j'ai enregistré le zéro en éliminant successivement la pile (galvanomètre en circuit ouvert), le galvanomètre (éclairage direct de la cellule) et la lampe (courant d'obscurité) : le déplacement de zéro affecte toujours la même allure, mais va en s'atténuant. La durée du phénomène est toujours à peu près la même : elle est vraisemblablement en grande partie imposée par les constantes de la salle.

a) **L'amplificateur.** — Pour l'amplificateur proprement dit, il importe surtout de protéger le galvanomètre, d'une part des mouvements de l'air et d'autre part des perturbations que produit l'éclairage intense du miroir. A cet effet, je l'ai placé dans une cloche métallique étanche munie d'une petite fenêtre de verre. On constate facilement l'efficacité de cette protection par l'expérience suivante : le galvanomètre étant en circuit ouvert, on allume la lampe de l'amplificateur, mais on intercepte le faisceau lumineux par un écran placé avant le galvanomètre ; au bout d'un temps suffisant pour que la lampe ait pris son régime, on enlève l'écran : si le galvanomètre n'est pas protégé, l'enregistrement débute par une courbe très accentuée. Si l'on met la cloche en place (en conservant la même amplification), l'enregistrement est rectiligne dès le début.

Si l'on doit évoluer dans la salle, il est bon de protéger la cellule. On peut utiliser le dispositif simple suivant : le support de quartz qui porte la cellule est fixé sur un plateau de paraffine traversé par deux fils de connexion ; une enveloppe de laiton munie d'une glace vient se placer sur la cellule et peut être, par un léger chauffage, encastrée dans la paraffine. Lorsque la lampe est allumée sous 4 volts, une cheminée suffit pour la protéger ; mais si, pour les grandes valeurs de K , on doit l'alimenter sous sa tension normale (8 volts), il est bon de l'entourer d'une enceinte à circulation d'eau. Ces précautions permettent d'avoir un amplificateur parfaitement stable.

b) **La pile et son circuit.** — L'élimination des déplacements de zéro dus à la pile et à son circuit est plus délicate. Deux séries de phénomènes interviennent en effet ici : les courants parasites et les effets thermiques.

1° **COURANTS PARASITES.** — Ces courants peuvent avoir trois origines : les champs magnétiques vagabonds, les forces thermo-électriques de contact, les défauts d'isolement. Les précautions à prendre pour éliminer ces phénomènes parasites

sont bien connues, je n'insisterai donc pas sur l'étude qui en a été faite. Je signalerai simplement l'importance qu'il faut attacher aux questions d'isolement. J'ai été conduit à adopter les dispositions suivantes :

1° La connexion entre la pile et le galvanomètre est constituée par une torsade sous gaine métallique souple aussi courte que possible (1 m environ).

2° Le galvanomètre repose sur trois cales de quartz. Ses bornes sont supprimées. Les deux fils arrivent directement aux lames de cuivre qui assurent la liaison avec l'intérieur du tube contenant l'équipage (1). Les connexions se font de cette façon au sein de la masse métallique constituée par le socle du galvanomètre.

3° Les bornes de la pile sont supprimées ; les extrémités des soudures sont reliées directement aux deux bornes qui traversent la boîte étanche par des fils soudés. Comme les soudures de la pile sont assez mal isolées de leur support, celui-ci est isolé du reste de l'appareil par une mince plaque d'ambroïne. Pour assurer l'uniformité de leur température, les deux bornes sont aussi rapprochées que possible, et isolées du socle par des rondelles très minces d'ambroïne. L'étanchéité entre borne-isolant et isolant-socle est assurée par des joints à la piscéine. Les fils allant au galvanomètre sont fixés à ces deux bornes par serrage. Ces bornes étaient initialement enveloppées d'ouate, mais, lorsque l'atmosphère de la salle n'est pas parfaitement sèche, cette ouate semble introduire des perturbations ; je l'ai donc supprimée par la suite, la protection contre les courants d'air étant assurée par la boîte de liège qui entoure l'appareil.

Toutes ces précautions tendent à supprimer des courants parasites qui se produiraient aussi bien si la pile était remplacée par une résistance. Toutefois, la présence de la pile

. (1) Il m'a été impossible de faire des soudures en cet endroit, ce qui aurait été cependant préférable.

introduit des parasites supplémentaires. On constate en effet qu'un circuit renfermant une pile détecte, par un processus mal expliqué, les champs magnétiques alternatifs. Il faut donc supprimer l'emploi de transformateurs dans le voisinage du circuit de la pile et s'assurer que les postes à ondes courtes fréquemment utilisés dans les laboratoires sont assez éloignés pour ne pas créer de perturbations.

2° EFFETS THERMIQUES. — Après quelques essais, j'ai jugé plus simple de supprimer toute introduction de l'opérateur dans la salle : à cet effet, j'ai séparé la cave en deux parties par une double cloison en bois munie d'une double porte. Les parois de la salle d'expérience sont alors constituées soit par un mur épais, soit par cette double paroi. De plus, l'appareil portant la pile est enfermé dans une boîte de liège épais munie de l'ouverture juste suffisante pour le passage du faisceau lumineux.

Bien entendu, le galvanomètre secondaire et son enregistreur sont dans la seconde salle ; les connexions se font par deux fils noyés dans un bloc de paraffine encastré dans la cloison. Au cours des mesures, les commandes et les lectures se font de l'extérieur, comme je l'indiquerai plus loin. Il subsiste, toutefois, dans la salle deux sources de chaleur : la lampe Nernst et la lampe de l'amplificateur (100 watts en tout). Tous les essais de stabilité ont été faits avec ces deux lampes en fonctionnement.

Dans ces conditions, le zéro est suffisamment stable pour permettre les mesures. Lorsque l'équilibre de température est atteint, on observe simplement la dérive du spot due à l'amplificateur ⁽¹⁾. Comme, au cours des mesures polarimétriques, on est amené à faire tourner l'appareil qui porte la pile, j'ai

(1) J'ai observé assez souvent, au cours de l'hiver, des déplacements importants du zéro se répétant deux fois par jour à peu près aux mêmes heures. Je pense qu'il faut attribuer ces déplacements à un tuyau de chauffage insuffisamment calorifugé, qui passe dans un coin de la cave.

cherché si ces rotations avaient une influence sur la stabilité : L'effet d'une rotation de quelques degrés est négligeable. Pour les rotations de 90° que l'on a souvent à effectuer, on observe une légère modification de la dérive; il suffit d'attendre quelques minutes pour obtenir à nouveau un enregistrement correct.

Après un séjour prolongé de l'opérateur dans la salle pour la mise en place des appareils et les réglages, il est nécessaire d'attendre une dizaine d'heures pour que le zéro soit stable. Si au cours d'une expérience il faut entrer quelques minutes dans la salle, on peut reprendre les mesures au bout d'une demi-heure.

VII. — Conclusion.

Les études précédentes m'ont conduit à adopter la méthode de mesure suivante : toutes les mesures sont faites par enregistrement sur papier photographique se déroulant à la vitesse de 5 mm à la minute. Lorsque le coefficient d'amplification est faible, on peut utiliser l'amplificateur à constante de temps normale; chaque déviation est enregistrée pendant deux minutes et, entre chaque mesure, le zéro est repris pendant le même temps. La figure 18 *a* représente une portion d'un enregistrement fait avec $K = 30$. Pour opérer avec de plus grandes valeurs de K , on utilise l'amplificateur à grande constante de temps. Si, pour la vérification du zéro, il est nécessaire d'attendre que le galvanomètre ait atteint sa position d'équilibre, ceci n'est pas indispensable pour la mesure des déviations : il suffit d'établir chaque fois le courant pendant le même temps (fig. 18 *b*).

Lorsque les enregistrements sont très bons, l'erreur maximum sur la mesure d'une déviation est de 0,25 mm. Dans

le cas général, on peut admettre une erreur de 0,5 mm, et, comme on s'arrange toujours pour que les déviations soient

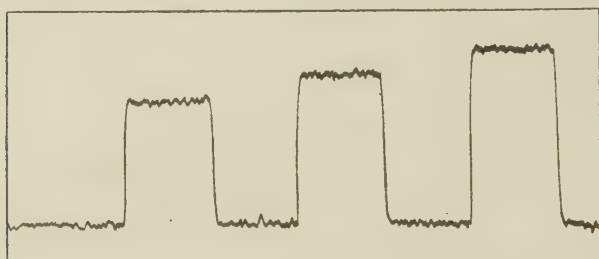


Fig. 18 a.

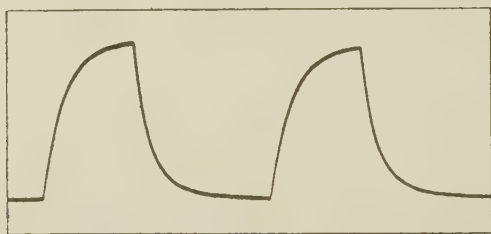


Fig. 18 b.

Fig. 18 a et 18 b. — Exemples de mesures.

de l'ordre de 50 mm, celles-ci sont déterminées à 1/100 près environ.

DEUXIÈME PARTIE

ÉTUDE

D'UN FAISCEAU DE RAYONS INFRA-ROUGES POLARISÉ ELLIPTIQUEMENT

$$10\mu > \lambda > 2,5\mu.$$

CHAPITRE PREMIER

CHOIX DE LA MÉTHODE POLARIMÉTRIQUE

Le fait que, dans l'infra-rouge, toutes les mesures se ramènent à la mesure de l'énergie calorifique transportée par les radiations, conduit à apporter des modifications importantes aux méthodes utilisées dans le spectre visible. Je me limiterai au cas où la longueur d'onde est comprise entre $2,5$ et 10μ ; le choix de ces limites n'est pas arbitraire : pour $\lambda < 2,5\mu$, on peut encore utiliser des prismes de spath, ce qui permet de simplifier et perfectionner certains montages; au delà de 10μ , certaines propriétés du sel gemme ne sont plus utilisables.

a) **Cas d'une vibration rectiligne.** — Indépendamment de l'analyseur à extinction trop peu sensible, le seul analyseur à deux plages réalisable dans la région spectrale considérée est un analyseur à pénombre. Mais le fait que, contrairement à ce qui se passe pour l'observation visuelle, la valeur absolue des différences de flux perceptibles ne dépend pas de l'intensité, conduit à utiliser un angle de pénombre aussi grand que possible ⁽¹⁾. En effet, soit 2θ l'angle de pénom-

(1) Voir G. BRUHAT : *Traité de Polarimétrie*, p. 163. — Des considérations analogues s'appliquent aux mesures photo électriques. Voir à ce sujet les travaux de M. BRUHAT, en particulier BRUHAT et GUINIER : *Revue d'Optique*, 1933, p. 385.

bre et A l'intensité de la vibration ; lorsque le flux Φ reçu par les deux plages est le même, on peut écrire :

$$\Phi = KA \cos^2 \theta \quad (1)$$

Pour une rotation $d\alpha$ de l'analyseur, les flux reçus deviennent Φ' et Φ'' et, on a :

$$\Phi' - \Phi'' = 2 KA \sin 2\theta d\alpha \quad (2)$$

Par conséquent, si $d\Phi$ est la plus petite différence de flux perceptible, la précision avec laquelle on peut définir l'azimut d'une vibration est :

$$d\alpha = \frac{d\Phi}{2 KA \sin 2\theta} \quad (3)$$

La précision est maximum pour $\theta = 45^\circ$; l'angle de pénombre doit donc être pris égal à 90° .

Remarquons de plus que l'on peut déterminer, soit en mesurant Φ , soit par des expériences directes, le rapport $\frac{d\Phi}{d\alpha}$ et que, par conséquent, il est inutile de réaliser l'égalité des plages.

b) **Cas d'une vibration elliptique.** — Dans le spectre visible, la détermination des axes d'une vibration elliptique à l'aide d'un analyseur à pénombre seul perd toute sensibilité dès que l'ellipticité atteint quelques degrés. Il n'en est pas de même ici.

Considérons un analyseur, ayant un angle de pénombre de 90° , et recevant une vibration elliptique dont les axes sont a et b ; lorsque le flux Φ reçu par les deux plages est le même, on a : $\Phi = K(a^2 + b^2)$ et, pour une rotation $d\alpha$ de l'analyseur, l'écart $d\Phi$ des deux flux est :

$$d\Phi = 2K(a^2 - b^2) d\alpha \quad (4)$$

Si l'on se place dans le cas d'une lumière d'intensité constante, on doit poser $a^2 + b^2 = A$, ce qui conduit, en appelant ψ l'ellipticité de la vibration ($\operatorname{tg} \psi = b/a$), à

$$d\alpha = d\Phi \cdot \frac{1}{2KA \cdot \cos 2\psi} \quad (5)$$

Ceci montre que la sensibilité reste encore appréciable pour des valeurs notables de l'ellipticité. Pour $\psi = 30^\circ$ par exemple ($b/a = 0,6$), la sensibilité est divisée seulement par 2.

Il résulte de ce qui précède que, pour déterminer les éléments d'une vibration elliptique, on peut éviter l'emploi de la méthode générale de Chaumont, qui serait d'ailleurs d'une réalisation pénible. La détermination se fait en deux temps :

1° Détermination des axes de l'ellipse ;

2° Détermination de l'ellipticité.

1° DÉTERMINATION DES AXES. PRINCIPE DE L'ANALYSEUR. — La réalisation de l'analyseur nécessite l'emploi d'un « système optique » capable de laisser passer une vibration rectiligne donnée et d'arrêter complètement la vibration perpendiculaire. Pour les longueurs d'onde supérieures à $2,5\mu$, on est obligé de faire appel aux miroirs de sélénium utilisés sous l'incidence brewstérienne ⁽¹⁾.

On peut constituer l'analyseur à deux plages par un ensemble de deux tels miroirs perpendiculaires entre eux recevant chacun la moitié du flux. Les flux réfléchis sont envoyés sur deux récepteurs (pile ou bolomètre) et tout l'ensemble est mobile autour d'un axe parallèle au faisceau incident. Ce dispositif a été employé par Försterling et Fréedericksz ⁽²⁾. Il a l'avantage d'être indépendant des variations du flux émis par la source, mais son réglage semble très délicat, en particulier à cause de la nécessité de séparer le flux incident en deux parties égales. J'ai préféré un dispositif plus simple. L'analyseur que j'ai utilisé comporte un seul miroir de sélénium recevant tout le flux et une seule pile. L'ensemble est naturellement mobile autour d'un axe parallèle au faisceau incident. Les valeurs du flux réfléchi par le miroir dans deux positions rectangulaires se déterminent successivement, et non simultanément. De ce fait, les mesures ne sont plus

(1) PFUND (A. H.) : *Astroph. journ.*, 24, 1906, p. 19.

(2) FORSTERLING et FRÉEDERICKSZ : *Ann. der Phys.* 40., 1913, p. 201.

indépendantes des variations de flux émis par la source. Dans le cas particulier où j'ai utilisé ce dispositif, l'effet de ces variations est négligeable devant les autres erreurs que j'étudierai plus loin. D'autre part, si l'on se reporte à la formule (5), on voit que la précision est d'autant plus grande que le flux utilisé est plus intense ; par conséquent, le dispositif précédent est deux fois plus sensible que l'appareil à deux miroirs : ceci est particulièrement intéressant lorsqu'on travaille avec des flux très faibles.

2° DÉTERMINATION DE L'ELLIPTICITÉ. MÉTHODE DU QUART D'ONDE.
— En tournant l'analyseur de 45° à partir de la position d'égalité des plages, le rapport des flux lumineux reçus par

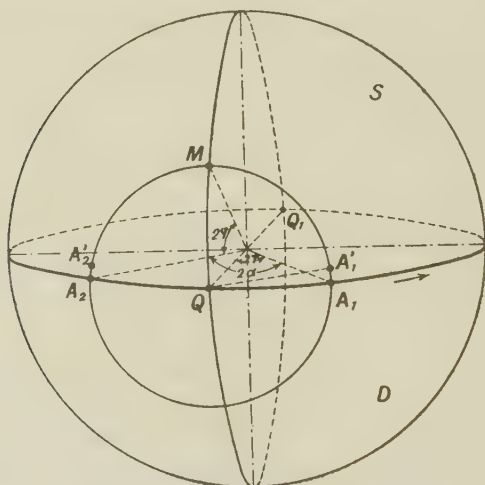


Fig. 19. — Méthode du quart d'onde.

les deux plages donne directement la valeur de $\text{tg}^2 \psi$. Ce procédé simple ne peut être utilisé que pour des ellipticités déjà grandes, et les résultats peuvent être faussés par la présence de lumière parasite. Il est donc nécessaire de pouvoir disposer d'une autre méthode : la méthode du quart d'onde est seule applicable ici. J'en rappelle brièvement le principe :

1° L'axe lent du quart d'onde étant amené en coïncidence avec le grand axe de l'ellipse étudiée M (fig. 19), on pointe, à l'aide de l'analyseur, la vibration rectiligne A_1 qui sort du quart d'onde;

2° On fait tourner le quart d'onde de 90° et on pointe la vibration rectiligne émergente A_2 , ce qui entraîne une rotation α de l'analyseur. On voit immédiatement sur la figure que l'on a :

$$\psi = \frac{\widehat{A_1 A_2}}{4} = \frac{\alpha}{2} \quad (6)$$

De plus, le sens de l'arc $\widehat{A_1 A_2}$ donne le sens de parcours de l'ellipse.

3° RÉALISATION D'UN QUART D'ONDE. — Etant donné les nombreuses bandes d'absorption des matières biréfringentes usuelles et la connaissance insuffisante de leurs constantes dans

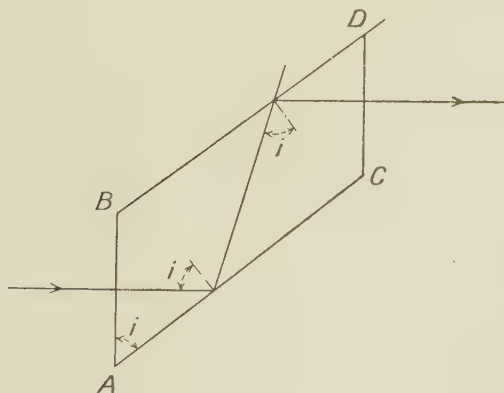


Fig. 20. — Parallélépipède de Fresnel.

l'infra-rouge, il est difficile de réaliser un quart d'onde à l'aide d'une lame biréfringente. J'ai donc essayé d'utiliser un parallélépipède de Fresnel. Un tel prisme présente le grave inconvénient de décaler le faisceau, mais il a l'avantage d'introduire

un retard qui varie peu dans un domaine étendu du spectre⁽¹⁾.

Si i est l'angle aigu du parallélépipède (fig. 20) chaque réflexion totale sous l'angle i d'une vibration polarisée rectilignement sur la surface de séparation prisme-air introduit entre la composante située dans le plan d'incidence et la composante perpendiculaire une différence de phase Δ . Si $\Delta = 45^\circ$, les deux réflexions successives introduisent un déphasage de 90° : le prisme se comporte comme un quart d'onde dont les axes sont respectivement parallèle et perpendiculaire au plan d'incidence. On peut d'ailleurs montrer que l'axe perpendiculaire au plan d'incidence est l'axe lent⁽²⁾.

La valeur du déphasage Δ est donnée par l'équation :

$$\operatorname{Tg} \frac{1}{2} \Delta = \frac{\cos i}{\sin^2 i} \sqrt{\sin^2 i - \frac{1}{n^2}} \quad (7)$$

On obtient la valeur de l'angle i du parallélépipède quart d'onde en remplaçant Δ par $\frac{\pi}{4}$ dans l'équation (7). Cette équation n'a de solution que si n est supérieur à 1,496. Le sel gemme, dont les indices sont bien connus, se prête bien à la réalisation de ce prisme. Les valeurs de son indice permettent de construire un quart d'onde pour les longueurs d'onde allant jusque 10μ . Sa faible absorption dans cette région rend possible l'emploi de prismes d'assez grandes dimensions, permettant d'utiliser des faisceaux larges.

Pour les longueurs d'onde comprises entre $6,5$ et 10μ , j'ai adopté un angle i de 53° . Les dimensions du prisme sont alors les suivantes : pour une face AB de côté 1, le côté BC doit

(1) On peut réaliser des prismes à 4 réflexions qui ne décalent pas le faisceau, mais leur longueur excessive conduit à les rejeter à cause de l'importance des pertes par absorption. D'autre part, il est très difficile de tailler un prisme de sel parfait, et il en résulte une légère déviation du faisceau émergent, d'autant plus accentuée que le nombre des réflexions est plus grand.

(2) Voir pour cette question et pour l'établissement de la formule (7) le traité d'optique de Wood.

être égal à 2,12 ; le trajet du faisceau lumineux dans la substance est de 2,65, le décalage du faisceau de 1,27.

Dans cette région spectrale, on peut calculer facilement que le retard introduit par le prisme ne s'écarte pas de 90° de plus de $\varepsilon = 1/40$. On peut chercher l'erreur qu'introduit cet écart pour la détermination de ψ . Si le quart d'onde n'est pas parfait, on détermine non pas les azimuts des points A_1 et A_2 mais ceux des points voisins A'_1 et A'_2 . Il est facile de voir sur la figure 19 que l'erreur introduite de ce fait est très faible. Cotton (1) a donné la formule qui permet de passer de la valeur ψ' mesurée à la valeur réelle de ψ ; on a :

$$\text{Tg} 2\psi' = \text{Tg} 2\psi \text{ Cos } \varepsilon \quad (8)$$

ε étant petit, l'erreur relative sur ψ est donnée par :

$$\frac{d\psi}{\psi} = \frac{\varepsilon^2}{2} \cdot \frac{\text{Sin } 4\psi}{4\psi} \quad (9)$$

Cette erreur est toujours inférieure à $\frac{\varepsilon^2}{2}$, c'est-à-dire ici à 1/3.000.

L'erreur introduite par l'inexactitude du quart d'onde est donc négligeable, et on pourra même dans certains cas étendre son emploi à une bande spectrale plus étendue.

(1) COTTON et MOUTON : *Ann. de Physique*, 20, 1910, p. 275.

CHAPITRE II

DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

J'ai étudié un dispositif permettant de déterminer l'état de polarisation d'un faisceau monochromatique de rayons infrarouges après réflexion sur une surface plane, lorsque le faisceau incident est polarisé rectilignement. L'ensemble du montage est représenté par la figure 21.

1. — Description des appareils.

a) **La source.** — La source de radiations doit être très constante : j'ai utilisé un filament Nernst (110 volts, 1 ampère) dont le courant est stabilisé par une résistance fer-hydrogène. Un miroir sphérique M forme l'image de ce filament sur la fente du monochromateur. Le premier miroir *m* constituant le diaphragme d'ouverture de ce monochromateur, le faisceau incident est limité par un diaphragme D conjugué de *m* par rapport au miroir M.

b) **Le monochromateur.** — J'ai utilisé un monochromateur à miroirs de Leiss qui existait au laboratoire. Il comporte un prisme de sel gemme de 60° et utilise le montage de Wadsworth. La description et l'étude d'un monochromateur de ce type ont été faites par Lecomte ⁽¹⁾ ; je n'insisterai pas sur cette question, et j'indiquerai seulement quelques points particuliers.

A cause de l'humidité de la cave où j'ai travaillé, j'ai dû protéger le prisme de sel contre une altération rapide. J'ai obtenu

(1) J. LECOMTE : Contribution à l'étude de l'absorption des rayons infrarouges par les composés organiques.

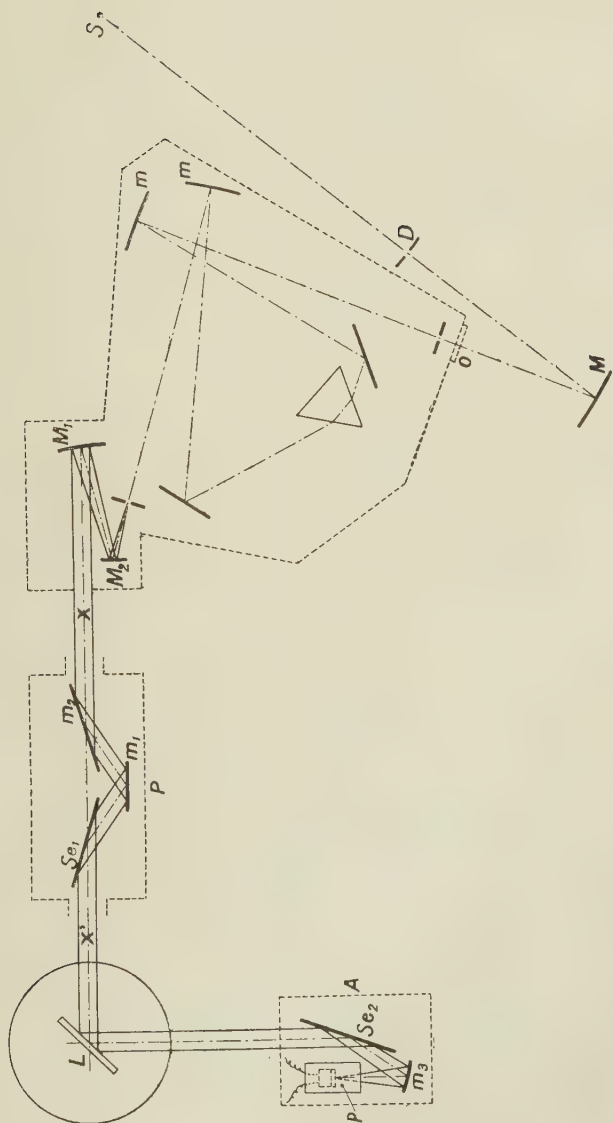


Fig. 21. — Schéma d'ensemble.

d'excellents résultats en plaçant le prisme sur une plate-forme chauffante qui maintient le prisme et l'air qui l'entoure à une température légèrement supérieure à celle de la salle (1 à 2°). J'ai pu utiliser ainsi le même prisme pendant plusieurs semaines.

Le monochromateur est utilisé dans les conditions les plus favorables lorsque la fente d'entrée et la fente de sortie ont la même largeur e . Si F est la distance focale des deux miroirs m , la bande spectrale que laisse passer le monochromateur a une étendue ⁽¹⁾ $d\lambda = \frac{e}{F} \cdot \sqrt{4 - n^2} \cdot \frac{1}{\frac{dn}{d\lambda}}$ ce qui donne, lorsque $e = 1 \text{ mm}$:

pour $\lambda = 5\mu$	$d\lambda = 1\mu$
7 μ	0,8 μ
9 μ	0,68 μ
10 μ	0,58 μ

Les longueurs d'onde se déterminent par la mesure des rotations du prisme.

Devant la fente d'entrée du monochromateur est placé un obturateur commandé électriquement; le mouvement est produit par l'avallement d'un noyau de fer doux dans une bobine.

A la sortie du monochromateur, le faisceau lumineux est rendu parallèle par un miroir M_1 de 13 cm de distance focale; le diamètre moyen de ce faisceau est de 2 cm. Comme il est indispensable de travailler avec un faisceau peu incliné sur l'axe du miroir, il faut introduire un miroir plan supplémentaire M_2 : c'est là un des nombreux inconvénients du monochromateur utilisé.

c) **Le polariseur.** — Le polariseur P est constitué essentiellement par un miroir de sélénium amorphe Se , recevant le faisceau sous l'incidence brewstérienne (70°). Les miroirs de sélénium se préparent de la façon suivante : on

(1) G. BRUHAT : *Annales de Physique*, 13, 1920, p. 25.

coule, sur une lame de verre qui doit servir de support au miroir, une quantité suffisante de sélénium fondu, puis on le comprime avec une autre lame de verre et on laisse refroidir. Si l'on a eu soin au préalable de chauffer la lame support à l'étuve tandis que l'autre glace est maintenue froide, après refroidissement, c'est cette dernière qui se décolle et le miroir reste adhérent à son support. J'ai utilisé des miroirs de $7\text{ cm} \times 4\text{ cm}$.

Pour que le polariseur puisse être utilisé dans tous les azimuts, le faisceau émergent doit avoir le même axe que le faisceau incident. Il faut donc adjoindre au miroir de sélénium un système de deux miroirs m_1 et m_2 . J'ai adopté le système décrit par Forsterling et Fréedericksz ⁽¹⁾ (fig. 21). Les deux miroirs auxiliaires sont en acier ; chaque miroir est fixé dans un support en laiton lié au bâti par trois vis calantes et maintenu en place par un fort ressort.

L'ensemble est mobile autour d'un axe confondu avec l'axe moyen du faisceau ; un cercle gradué permet de repérer l'orientation de l'appareil.

d) **Le support de la surface réfléchissante.** —

La surface réfléchissante doit pouvoir tourner : 1° autour d'un axe vertical contenu dans son plan, pour permettre le réglage de l'angle d'incidence i ; 2° autour d'un axe horizontal perpendiculaire à son plan, pour permettre l'orientation de l'axe du cristal dans lequel est taillée la surface. J'ai utilisé comme support un goniomètre dont le collimateur est supprimé ; la lunette, rendue autocollimatrice, sert aux réglages. La rotation de la plate-forme permet de réaliser le premier mouvement. Sur cette plate-forme repose, par l'intermédiaire de deux billes et d'une vis calante v , une plaque de laiton maintenue en place par trois ressorts. Cette plaque porte un support analogue à ceux couramment utilisés pour les nicols. Ce support

(1) *Loc. cit.*

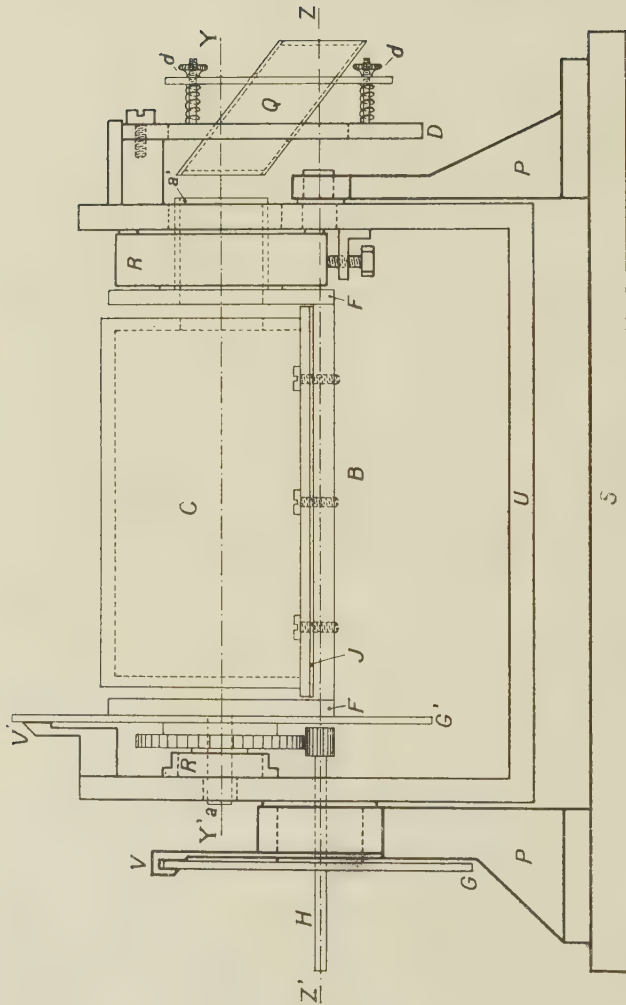


Fig. 22. — Analyseur. Echelle 4/3.

permet de réaliser la rotation autour d'un axe horizontal. La monture qui porte la surface réfléchissante est liée à la partie mobile par un système de vis calantes v' et de ressorts. Naturellement, les rotations autour des deux axes peuvent être mesurées à l'aide de cercles gradués.

e) **Dispositif analyseur.** — Avant d'aborder la description de l'analyseur j'indiquerai les considérations qui m'ont guidé dans le choix du récepteur d'énergie : 1° pour réduire au minimum le nombre des miroirs, le récepteur doit être monté directement sur la partie mobile de l'analyseur ; 2° il est facile de voir, d'après le trajet du faisceau, que la section de ce faisceau par le plan de la surface réceptrice est un coma dont la forme varie avec l'orientation relative de l'analyseur et du polariseur. Cette surface réceptrice doit donc être suffisamment étendue pour capter toute l'énergie. Deux instruments permettent de réaliser ces conditions : le bolomètre et la pile thermo-électrique. J'ai utilisé une pile de Moll, type micro, qui existait au laboratoire : ses dimensions sont très faibles et sa surface réceptrice a 6 mm de diamètre.

Le dispositif analyseur comprend deux parties : le quart d'onde et l'analyseur proprement dit. Du fait que le quart d'onde décale le faisceau lumineux, les mouvements de ces deux parties ne peuvent être indépendants. La disposition adoptée est la suivante : un mouvement général entraîne autour d'un axe ZZ' le quart d'onde et l'axe YY' autour duquel peut tourner l'analyseur. Lorsque l'analyseur est employé seul, le mouvement général est bloqué dans une position fixe et l'axe YY' est amené en coïncidence avec l'axe moyen du faisceau. Lorsqu'on introduit le quart d'onde, on décale l'ensemble pour substituer l'axe ZZ' à l'axe YY' ; quelle que soit l'orientation du mouvement général, l'axe YY' coïncide alors avec l'axe du faisceau sortant du quart d'onde. Si les axes ZZ' et YY' sont parallèles, il n'y a aucune difficulté

pour déterminer la rotation de l'analyseur par rapport à un azimut fixe ; on a en effet :

Rotation réelle de l'analyseur = rotation par rapport au mouvement général + rotation du mouvement général.

Le mouvement général (fig. 22) est réalisé par la rotation d'un bâti en U qui porte deux axes tournant dans les paliers P. L'axe arrière porte un cercle divisé qui se déplace devant un vernier V fixé au palier. Ce bâti porte l'analyseur par l'intermédiaire de deux roulements à billes à rotule R ; le roulement arrière est fixe, le roulement avant est porté par trois vis pour permettre le réglage de l'orientation relative des axes ZZ' et YY' (une seule de ces vis est figurée sur le schéma). Les grandes dimensions de ce roulement sont imposées par le fait que l'arbre a' doit être creux pour laisser passer le faisceau. Les axes a et a' portent, par l'intermédiaire des flasques F, la plate-forme B qui constitue la base de la boîte étanche contenant l'analyseur. On a représenté seulement sur la figure le couvercle C muni de sa fenêtre transparente ; il vient se visser sur la plate-forme après interposition du joint de caoutchouc J. Les organes intérieurs sont représentés sur la figure 21. Ces organes sont portés par un plateau A vissé sur la plate-forme. Le faisceau, en pénétrant dans l'analyseur, rencontre sous l'incidence brewstérienne le miroir de sélénium analyseur Se_2 ; le faisceau réfléchi est concentré sur la pile p par le miroir sphérique m_3 de 7 cm de distance focale. Les fils de connexion de la pile, qui sortent du tube de cuivre rouge, sont soudés aux bornes scellées dans la plate-forme. L'isolement électrique est réalisé comme je l'ai indiqué dans la première partie (p. 37). Les deux miroirs sont portés par des systèmes à vis calantes analogues à ceux du polariseur.

Un disque gradué G' fixé à l'axe a se déplace devant un vernier V' fixé au bâti en U, et permet de mesurer les rotations relatives de l'analyseur et du mouvement général. La rotation de l'analyseur est commandée par un pignon H dont l'axe coïncide avec ZZ' . Cette disposition présente deux avan-

tages : lorsqu'on fait tourner le mouvement général, l'axe du pignon de commande reste fixe; de plus, si l'on immobilise ce pignon, l'analyseur garde la même orientation au cours de la rotation.

A l'avant du bâti U peut venir se visser un cadre D qui porte le support du quart d'onde ; des vis *d* permettent de régler l'orientation de ce support. L'emploi d'un prisme de sel gemme au voisinage immédiat de la pile est délicat, car on ne peut songer à le chauffer pour le protéger de l'humidité ; d'autre part, les deux faces réfléchissantes, qui doivent être très propres, ne peuvent être vernies. J'ai utilisé l'artifice suivant : le prisme de sel est introduit dans le tube Q et calé par ses deux faces inutilisées, puis le tube est fermé à ses deux extrémités par des plaques de laiton percées d'un trou circulaire nécessaire au passage des radiations ; ces plaques sont collées au tube et au prisme avec de la cire très fusible. De cette façon, les faces réfléchissantes sont isolées de l'air extérieur. Dans une salle bien sèche les faces terminales se maintiendraient en état au moins pendant la durée d'une mesure : il n'en était pas de même dans la cave, et j'ai dû les protéger en les balayant par un très faible courant d'air sec. Ce courant d'air diminue peu la stabilité du courant thermo-électrique, mais il augmente fortement le temps nécessaire pour arriver au régime stable à partir du moment où le prisme est mis en place. J'ai utilisé un prisme dont les faces extrêmes ont 1,5 cm de côté, ce qui impose une distance de 32 mm entre les axes ZZ' et YY' (voir p. 46).

L'ensemble de l'appareil est porté par un socle S muni de trois vis calantes; les pointes de ces vis viennent se loger dans des crapaudines fixées à un second socle qui repose, par trois billes soudées à sa partie inférieure, sur un marbre d'atelier ; une seule de ces billes est guidée par une rainure perpendiculaire à ZZ'. Deux vis munies de ressorts de rappel commandent les déplacements de l'appareil. Le but de ce montage est : 1° de permettre la mise en place correcte de l'analyseur

après un réglage grossier seul possible directement étant donné le poids de l'analyseur. 2^o de réaliser facilement la substitution des axes ZZ' et YY' ; lorsqu'on n'utilise que l'analyseur, les deux axes sont amenés dans un même plan horizontal, l'axe YY' étant en coïncidence avec l'axe du faisceau; lorsqu'on introduit le quart d'onde, il suffit alors de donner à l'appareil une translation de 32 mm perpendiculairement à ZZ' pour qu'il soit de nouveau en place.

Comme je l'ai déjà indiqué dans la première partie, l'appareil est protégé thermiquement par une boîte de liège de 2 cm d'épaisseur.

f) **Commandes et lectures des rotations à distance.** — Il ne saurait être question de commander tous les mouvements de l'extérieur. En réalité, une mesure comporte une série de déterminations d'azimuts de vibration, et c'est chacune de ces déterminations qu'il faut pouvoir faire de l'extérieur afin que l'opération soit assez rapide pour qu'on puisse admettre la constance de la sensibilité de l'amplificateur. Il suffit donc de pouvoir commander la rotation de l'analyseur à distance. Cette rotation est obtenue à l'aide d'un petit moteur à démultiplication qui entraîne le pignon H par un joint de caoutchouc qui traverse la boîte de liège. La rotation minimum que l'on peut produire ainsi est de 20 min., ce qui est suffisant étant donné que, dans toutes ces mesures, il n'est jamais nécessaire d'amener l'analyseur dans une position déterminée.

Pour permettre les lectures, la paroi arrière de la boîte de liège est munie d'une fenêtre de glace épaisse de 3×3 cm placée en face du vernier V'. Ce vernier est éclairé de l'extérieur de la boîte par une lanterne constituée par un tube de laiton portant à un bout une petite ampoule (3,5 volts) et à l'autre une lentille qui rend le faisceau lumineux légèrement convergent. Un miroir orientable, fixé au tube, permet l'observation de la graduation à l'aide d'une lunette placée à l'extérieur

de la salle. Les visées se font à travers deux glaces mastiquées dans la double cloison.

REMARQUES. — L'établissement et la rupture du courant du moteur n'introduisent que des perturbations instantanées qui ne gênent pas les mesures.

A condition qu'elle reste allumée en permanence, la lampe d'éclairage du vernier n'introduit aucune perturbation.

II. — Réglages.

Les réglages doivent être faits avec grand soin ; deux points sont particulièrement importants : le réglage du faisceau incident, qui doit être parallèle à l'axe XX' et centré sur cet axe quel que soit l'azimut du polariseur ; le réglage de l'analyseur, dans lequel l'image de la fente source qui se forme sur la pile doit rester fixe au cours des rotations. J'ai adopté pour tous ces réglages des procédés d'autocollimation.

Je rappellerai à ce sujet, sans entrer dans le détail des procédés, qu'une lunette autocollimatrice permet les opérations suivantes :

1° Amener une lame à faces parallèles à être parallèle à un miroir ;

2° Amener une surface réfléchissante perpendiculaire à son axe ;

3° A l'aide d'un miroir auxiliaire, amener l'axe de la lunette à être parallèle à l'axe de rotation d'un appareil : le miroir est alors perpendiculaire à cet axe ;

4° A l'aide d'une lame à faces parallèles, amener l'axe de la lunette à être perpendiculaire à un axe de rotation : la lame est alors parallèle à cet axe.

J'ai adopté comme plan de référence le plan horizontal défini par un bain de mercure. Pour avoir un bain de mercure peu sensible aux vibrations, on utilise une goutte de mercure

étalée sur le fond légèrement conique d'une cuvette en cuivre amalgamé.

Divers accessoires sont nécessaires pour effectuer les réglages : la lunette autocollimatrice L_1 du goniomètre : cette lunette a un objectif de 16 cm de distance focale, elle permet de définir une direction à 1 minute près ; une seconde lunette analogue L_2 dont le diaphragme porte-réticule est un trou de 2 mm de diamètre que l'ont peut éclairer vivement : elle fournit alors un faisceau de lumière parallèle bien défini ; un goniomètre dont la plate-forme porte un miroir horizontal et une lame verticale qui sont réglés de façon à être respectivement perpendiculaire et parallèle à l'axe de l'appareil ; enfin, des miroirs orientables pouvant venir se placer aux deux extrémités du polariseur, à l'entrée de l'analyseur et sur l'axe ZZ' ; chaque support de miroir porte en outre des fils croisés qui définissent l'axe de l'appareil correspondant.

a) **Réglage du polariseur.** — Après un réglage grossier qui permet la mise en place de l'appareil et l'orientation approximative des miroirs, le réglage définitif se fait de la façon suivante :

1° On dispose à la sortie de l'appareil une lame à faces parallèles orientable l_1 que l'on rend parallèle à l'axe de rotation par autocollimation tout en la maintenant normale au plan de symétrie du polariseur (plan de la figure 23). Ceci fait, par rotation de l'appareil et réglage des vis calantes on amène cette lame à être parallèle au bain de mercure. *L'axe de rotation du polariseur est alors horizontal.*

2° Le goniomètre est placé de façon à permettre les visées sur la lame l_1 et sur le miroir Se_1 ; son axe est rendu vertical à l'aide du miroir fixé à la plate-forme ; sa lame l_2 définit alors un plan vertical d'azimut variable. En faisant tourner l'analyseur et la plate-forme du goniomètre, on amène les lames l_1 et l_2 à être parallèles ; l'analyseur est immobilisé, on tourne la lame l_2 de 30° , et on rend le miroir de sélénium

parallèle à cette lame : le miroir Se_1 est alors vertical et fait avec l'axe du polariseur l'angle de 70° correspondant à l'incidence brewstérienne. De plus, le polariseur est dans la position qui donnera, après le réglage complet, de la lumière

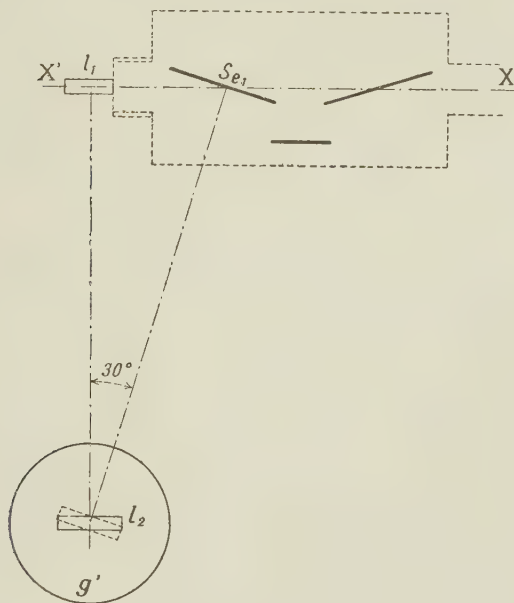


Fig. 23. — Dispositif de réglage.

vibrant verticalement : on repère cette position sur le cercle gradué. Pour éviter les erreurs dues au centrage de ce cercle, on utilise la lame l_1 pour repérer la position à 180° , les deux positions donnant une vibration horizontale, les quatre positions donnant une vibration à 45° de la verticale (ceci se fait en visant avec la lunette horizontale le bain de mercure par réflexion sur la lame). De cette façon, ces huit positions du polariseur sont déterminées à 2 minutes près environ.

3° Il reste à régler les deux miroirs m_1 et m_2 pour qu'un faisceau parallèle à l'axe XX' ne soit pas dévié ni décalé par

le polariseur, il est facile de voir que ceci suffit pour que le polariseur soit complètement réglé. On utilise pour ce réglage un faisceau de lumière parallèle, parallèle à l'axe de rotation XX' , fourni par la lunette L_2 ; cette lunette est au préalable réglée par autocollimation sur un miroir auxiliaire placé à l'entrée du polariseur, et le faisceau est centré sur la croisée des fils qui définit un point de l'axe. La lunette L_1 est de même réglée sur l'axe XX' côté sortie. On agit alors sur l'orientation des miroirs m_1 et m_2 pour que :

1° L'image du point de croisée des fils du réticule de L_2 qui se forme dans le plan focal de la lunette L_1 coïncide avec le point de croisée du réticule de cette lunette ;

2° Le faisceau émergent reste centré sur l'axe.

On vérifie ce réglage en faisant tourner le polariseur, l'axe du faisceau doit rester fixe.

b) **Réglage du faisceau incident.** — (Le monochromateur est supposé réglé. Son prisme est dans la position qui correspond à la raie verte du mercure). Le miroir auxiliaire, remis en place à l'entrée du polariseur, permet de placer les miroirs M_2 et M_1 et de centrer le faisceau sur l'axe XX' ; ce réglage n'est pas suffisamment précis ; pour l'améliorer, on observe l'image de la fente du monochromateur donnée par la lunette L_1 placée après le polariseur. Le fait que le miroir M_1 ne donne pas une image de la fente, mais deux focales, rend ce réglage délicat. On obtient le meilleur résultat en cherchant à rendre immobile le centre de la tache lumineuse observée dans la lunette lorsqu'on fait tourner le polariseur : des considérations simples d'optique géométrique permettent de déduire des observations les déplacements qu'il faut faire subir à M_1 .

Les réglages précédents, très longs, ne sont pas repris au cours d'une série de mesures ; on utilise toujours, comme point de départ des réglages ultérieurs, un miroir auxiliaire p perpendiculaire à XX' placé à la sortie du polariseur ; avec le

point de croisée de ses deux fils ω , il définit complètement l'axe du faisceau incident. Ce miroir est facilement mis en place par une autocollimation.

c) **Réglage de la surface réfléchissante.** — En général, cette surface fait partie d'une lame à faces parallèles. C'est alors la lame elle-même qui sert aux réglages. Deux fils croisés, portés par un anneau amovible fixé aussi près que possible de la lame définissent son centre O.

1° Un petit miroir porté par la plate-forme du support permet de rendre vertical l'axe de rotation de cette plate-forme.

2° En agissant uniquement sur les vis v' ; on rend la lame normale à l'axe de rotation horizontal.

3° On amène la lame à être parallèle à l'axe vertical en agissant uniquement sur la vis v . Cette lame est alors verticale; elle peut tourner autour d'un axe vertical et d'un axe horizontal qui lui est perpendiculaire.

4° La lame est rendue parallèle au miroir p par rotation de la plate-forme; elle est alors normale au faisceau incident. Cette opération n'est possible que si tous les réglages sont corrects; elle constitue une excellente vérification.

5° Pour que la lame soit centrée sur le faisceau, il faut que le point O, son image dans le miroir p et le point ω soient alignés. Un déplacement du support de la lame par rapport à la plate-forme permet ce centrage. Il est bon, après l'opération, de vérifier les réglages 3 et 4.

6° Si i est l'angle d'incidence choisi, on fait tourner la plate-forme de l'angle $2i$. La lame et le point O définissent alors complètement le faisceau réfléchi.

Le procédé employé pour orienter l'axe du cristal dans lequel est taillée la lame dépend de la lame dont on dispose. J'indiquerai plus loin comment j'ai opéré.

d) **Réglage de l'analyseur.** — 1° RÉGLAGE DES ORGANES INTÉRIEURS. — Le couvercle C étant enlevé, on envoie

dans l'appareil un faisceau de lumière parallèle fourni par la lunette L_2 réglée comme pour le polariseur. Ce faisceau permet de régler l'orientation des miroirs et la position de la pile de façon que le faisceau vienne converger sur les soudures de celle-ci ; le couvercle est mis en place et l'analyseur est remplacé, pour les réglages suivants, par un miroir auxiliaire α perpendiculaire à son axe et un point σ de cet axe.

2° MISE EN PLACE DE L'ANALYSEUR. — Pour amener l'axe YY' à coïncider avec l'axe du faisceau réfléchi, il suffit de rendre le miroir α parallèle à la lame et d'aligner le point O , son image dans α et le point σ . Cette opération se fait en agissant sur les vis calantes de l'analyseur et sur les vis qui commandent son déplacement sur le marbre ⁽¹⁾.

La lame est alors amenée à sa position définitive par une rotation i dans le sens convenable. Si cette lame ne peut jouer le rôle d'une lame à faces parallèles, on exécute les réglages à l'aide d'une lame auxiliaire. Une autocollimation permet de lui substituer la surface réfléchissante à la fin du réglage.

3° MISE EN PLACE DU QUART D'ONDE. — On amène l'axe ZZ' en coïncidence avec l'axe du faisceau par le procédé déjà employé pour YY' ; le quart d'onde est alors mis en place, et sa face d'entrée est rendue normale à ZZ' . Si le quart d'onde était parfait, ce réglage suffirait, à condition bien entendu que les axes ZZ' et YY' aient été amenés une fois pour toutes au parallélisme. En réalité, le faisceau qui sort du quart d'onde n'est jamais rigoureusement parallèle au faisceau incident ; YY' doit donc être parallèle non pas à ZZ' mais à ce faisceau émergent. Ce réglage se fait par autocollimation sur le miroir α en observant à travers le prisme et en agissant sur les vis qui

(1) On pourrait, comme pour le polariseur, régler avec précision l'angle du miroir de sélénium avec l'axe. Cette opération n'est pas indispensable pour l'analyseur.

portent le roulement R. Ce décalage des axes entraîne quelques modifications dans les méthodes de mesure.

Si l'on voulait étudier non plus la lumière réfléchie mais la lumière transmise par une lame, les réglages se feraient d'une façon tout à fait analogue.

Après la mise en place du miroir M_1 , le monochromateur est amené sur la longueur d'onde utilisée pour les mesures. Les procédés décrits ci-dessus permettent d'effectuer les réglages sans avoir à chaque instant à ramener le monochromateur sur une longueur d'onde du spectre visible.

III. — Etude de l'analyseur.

Pour étudier l'analyseur, j'ai amené les axes XX' et YY' en coïncidence ; le faisceau qui pénètre dans l'analyseur est polarisé rectilignement. La construction, par points, pour un tour complet, de la courbe $\delta = f(\alpha)$, représentant la déviation du galvanomètre en fonction de l'orientation de l'analyseur, conduit aux résultats suivants (α représente les divisions lues sur le cercle gradué de l'analyseur ; l'origine est quelconque) :

1° Le rapport entre l'énergie transmise lorsque les deux miroirs de sélénium sont croisés et lorsqu'ils sont parallèles est égal à 1/200 environ. Ce résultat, en parfait accord avec ceux de M. Le Roux (¹), montre que les miroirs ne sont pas des polariseurs parfaits. Si la lumière parasite n'est nullement gênante pour les déterminations d'azimut, elle interdit la mesure directe du rapport des axes.

2° La courbe n'est pas une sinusoïde parfaite ; en particulier, les deux maxima n'ont pas la même intensité ; l'écart varie suivant les cas entre 5 et 10 %, alors que les intensités sont déterminées à 1/100 près. Il en résulte que, si, conformé-

(1) LE ROUX : *Ann. de Physique*, 20, 1933, p. 518.

ment au principe énoncé dans le premier chapitre pour la détermination de l'orientation α_0 de la vibration incidente, on cherche deux positions de l'analyseur à 90° l'une de l'autre qui fournissent la même déviation, on trouve quatre valeurs différentes de α_0 suivant les deux positions choisies.

Il est facile de vérifier ce résultat : on détermine les portions de la courbe $\delta = f(\alpha)$ au voisinage des quatre positions de pénombre. Ces portions de courbe sont pratiquement des

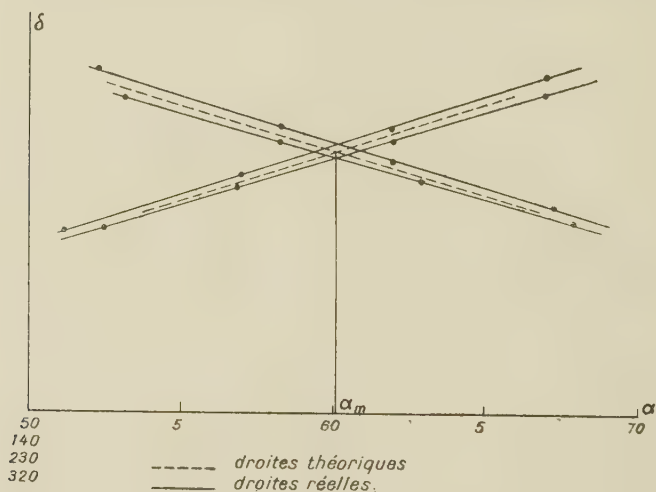


Fig. 24. — Détermination de α_0 .

droites. On reporte ces droites sur un même graphique en décalant chaque fois les abscisses de 90° . Si l'appareil était parfait, ces droites seraient confondues deux à deux et également inclinées sur les axes ; les 4 abscisses du point d'intersection définiraient un système d'axe à 45° des axes de la vibration (fig. 24). En réalité, on obtient quatre droites distinctes qui fournissent quatre points d'intersection. L'écart maximum entre ces points est en général de l'ordre de 1 degré, mais peut atteindre 2 et 3 degrés. Ces écarts ne peuvent être dus aux erreurs d'expérience, en effet :

1° Les points qui servent à tracer chaque portion de courbe, sont déterminés à $1/50$ près et se placent très correctement sur une droite ;

2° Lorsqu'on répète plusieurs fois la même mesure, la position relative des quatre droites reste la même ;

3° Chaque point d'intersection est déterminé à quelques minutes près.

Pour expliquer ces écarts, il faut remarquer que le faisceau qui pénètre dans l'analyseur, ayant subi sur des miroirs sphériques quatre réflexions sous une incidence notable, n'est pas un faisceau cylindrique et homogène : il possède seulement deux plans de symétrie rectangulaires. De ce fait, les défauts d'homogénéité de la fenêtre et des miroirs Se_2 et m_3 n'ont pas les mêmes effets suivant l'orientation de l'analyseur. De plus, le miroir m_3 , utilisé sous une grande ouverture, forme sur la pile non pas une image de la fente du monochromateur, mais un coma dont la forme varie avec l'orientation relative du polariseur et de l'analyseur.

La surface du miroir m_3 , en acier poli, introduit certainement très peu de perturbations ; on ne peut affirmer la même chose du miroir de sélénium, dont la surface utilisée est très grande. J'avais pensé qu'on pourrait améliorer l'appareil en modifiant la place de la fenêtre. En effet, cette fenêtre (en fluorine dans le cas étudié) est placée avant le miroir analyseur et traversée par un faisceau large (18 mm de diamètre) ; comme il est difficile d'obtenir des disques de ce diamètre en fluorine bien pure, celle-ci peut introduire des perturbations par son manque d'homogénéité et par les petites biréfringences accidentelles. Il y aurait donc intérêt à utiliser le montage *a* décrit page 34, dans lequel la pile seule est dans une enceinte étanche ; la fenêtre, qui se trouve alors tout contre la pile, est dans la position la plus correcte : elle est placée après le miroir analyseur et au point où le faisceau est le plus étroit. Des essais faits avec ce montage n'ont conduit à aucune amélioration.

ration. J'ai vérifié, d'autre part, que la lame de fluorine utilisée ne présentait pas de biréfringence.

Il semble que la pile soit la principale cause des écarts observés. J'ai vérifié en effet que, pour un flux donné, sa sensibilité varie suivant l'orientation et la forme de la trace du faisceau sur la surface réceptrice. L'expérience suivante met ce phénomène en évidence : on monte la pile sur un support qui permet de la faire tourner autour de son axe :

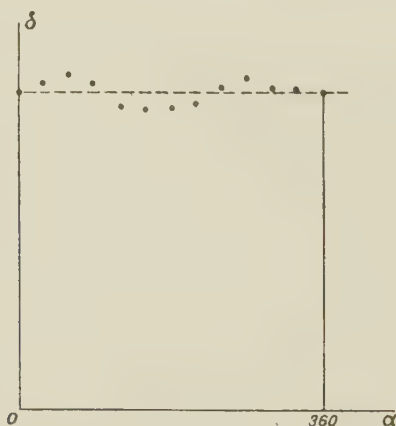


Fig. 25. — Variations du courant thermo-électrique en fonction de l'orientation de la pile.

avec un trou uniformément éclairé et une lentille excentrée, on forme au centre de la pile une focale ayant les dimensions de l'image reçue normalement dans le montage. On constate alors que, si l'on fait tourner la pile autour de son axe, le courant thermo-électrique varie régulièrement (fig. 25). L'écart entre les valeurs extrêmes du courant est égal au dixième du courant moyen. Cet écart diminue, si l'on se place au cercle de moindre diffusion ; il augmente si l'on diminue l'homogénéité du faisceau. Ces variations s'expliquent par le fait que la surface réceptrice, étant constituée par les soudures elles-mêmes, n'est pas homogène.

D'autre part, lorsqu'on diaphragme fortement le faisceau, si les imperfections dues aux miroirs diminuent, par contre celles dues au manque d'homogénéité de la surface réceptrice augmentent. Or, on observe dans ce cas une augmentation de l'écart entre les quatre valeurs de α_0 , ce qui montre bien que le rôle de la pile est prépondérant.

Malgré ses défauts, j'ai essayé de tirer parti de cet appareil en cherchant si la moyenne α_m des quatre valeurs trouvées pour α_0 peut servir à repérer la vibration incidente (1).

L'emploi de cette valeur α_m est justifiée si, lorsqu'on fait tourner le plan de polarisation de la vibration incidente d'un angle Θ , la valeur de α_m varie de la même quantité. Ceci n'est pas évident, du fait que, si le plan de polarisation de la vibration incidente tourne, l'orientation relative des plans de symétrie du faisceau et des positions de pénombre de l'analyseur varie et la figure formée par les quatre droites du graphique se modifie.

L'étude de l'analyseur recevant directement le faisceau qui sort du polariseur m'a donné les résultats suivants :

1. — Plusieurs déterminations de α_m fournissent des valeurs qui ne diffèrent pas de plus de 10 minutes.

2. — α_m varie très peu lorsqu'on modifie la constitution du faisceau incident ; pour vérifier cette propriété, je me suis placé dans des conditions nettement plus défavorables que les conditions normales d'expérience en supprimant, à l'aide de diaphragmes, différentes parties du faisceau. J'ai utilisé successivement un diaphragme de 17 mm de diamètre centré sur l'axe YY', un diaphragme de 11 mm d'abord centré sur l'axe puis dans quatre positions excentrées de 3 mm. Les 6 valeurs trouvées pour α_m sont : $65^\circ - 65^\circ,15' - 64^\circ,55' - 65^\circ,10' - 65^\circ,15' - 65^\circ,15'$. Toutes ces valeurs sont comprises dans un intervalle de 20 minutes alors que, pour chacune des

(1) J'ai essayé, sans résultats, d'utiliser les diamètres des 4 droites prises deux à deux.

quatre dernières positions du diaphragme, les écarts entre les valeurs de α_0 atteignent plusieurs degrés.

3. — Une rotation Θ de la vibration incidente se traduit par une variation de α_m égale à $\Theta + \varepsilon$. Lorsque les réglages sont corrects, ε est inférieur à 5 minutes pour des rotations de quelques degrés, et à 20 minutes pour des rotations de 90° . Pour deux positions du polariseur à 180° l'une de l'autre, les deux valeurs de α_m ne diffèrent pas de plus de 15 minutes et sont généralement très voisines. Voici par exemple les résultats obtenus au cours d'une expérience :

Azimut du polariseur (1)	Lectures	Moyennes	Rotations de l'analyseur	
0° ↑	156°03'	156°07'	0	(1) Les petites flèches figu- rent le sens de la nor- male au mi- roir de sélé- nium du po- lariseur et permettent de distin- guer les deux posi- tions à 180°.
↓	156°10'			
6°06' ↓	162°20'	201°06'	44°59'	
45° ↗	201°10'			
↘	201°02'	245°50'	89°43'	
90° →	245°50'			
←	245°50'			

4. — Lorsque la vibration incidente est verticale, on peut vérifier que la division α_m correspond bien à la position de l'analyseur pour laquelle le miroir de sélénium Se_2 est vertical. Dans l'expérience précédente, j'ai trouvé, en employant le procédé du goniomètre auxiliaire utilisé pour le polariseur, que le miroir Se_2 était vertical pour la division $245^\circ, 48'$; malheureusement, la vérification n'est possible que pour cette position.

Les erreurs observées sont certainement dues pour la plus grande part aux défauts de l'analyseur. Il ne faut cependant pas oublier que le fait que les miroirs ne sont pas des polari-

seurs à champ normal peut introduire des erreurs. En effet, les différentes portions du faisceau qui sort du polariseur ne sont pas polarisées exactement dans le plan défini par la normale au miroir Se_1 et à l'axe XX' . Si la répartition de l'énergie dans les différents plans de polarisation n'est pas symétrique, on ne peut plus admettre que le plan de polarisation moyen est le plan défini précédemment, et l'angle de ces deux plans varie au cours des rotations du polariseur, du fait que la rotation des plans de symétrie du faisceau émergent est double de la rotation du polariseur.

Un défaut de réglage du parallélisme de l'axe de l'appareil et de l'axe du faisceau peut entraîner une telle dissymétrie; ce réglage est très délicat et d'autant plus difficile que le faisceau est moins stigmatique. Il en résulte que, si les positions du polariseur sont définies à 2 minutes près, la direction du plan de polarisation moyen est définie avec une précision moindre. A cause de la forme du faisceau il est difficile de chiffrer exactement cette précision.

Pour des raisons analogues, si l'axe de l'analyseur n'est pas parallèle à l'axe moyen du faisceau, le miroir analyseur introduit des erreurs dans la mesure des rotations.

Les expériences 2, faites dans des conditions particulièrement défavorables à ce point de vue, et l'expérience 3 montrent que les erreurs introduites par ces défauts de réglage sont nettement inférieures à 20 minutes.

Les résultats de l'étude de l'analyseur et la cohérence des résultats obtenus dans les mesures ultérieures permettent d'admettre que la valeur moyenne α_m repère l'orientation d'une vibration à 15 minutes près.

Cette valeur α_m repère la vibration par rapport au zéro de la graduation. Pour déterminer l'orientation de cette vibration par rapport au plan horizontal de référence, il est nécessaire de déterminer la valeur de α_m pour une vibration connue. On pourrait prendre comme vibration de référence la vibration verticale et admettre que la division α_m correspondante est la

division pour laquelle le miroir Se_2 est vertical. Pour la cohérence des mesures, j'ai préféré déterminer α_m toujours de la même façon pour la vibration étudiée et pour la vibration de référence.

LE QUART D'ONDE. — Il est difficile de faire des mesures pour vérifier les propriétés du quart d'onde. On peut cependant signaler le résultat suivant : en envoyant successivement sur le quart d'onde une vibration rectiligne parallèle à l'axe lent et une vibration rectiligne dont la direction est nettement inclinée sur cet axe (15° environ), on recueille à la sortie deux vibrations dont les axes sont parallèles, aux erreurs d'expérience près. Il est facile de voir que dans ce cas l'écart des azimuts et l'inexactitude du quart d'onde (différence entre le retard introduit et $\pi/2$) sont du même ordre.

IV. — Marche d'une mesure. Précision.

a) **Définitions.** — L'orientation d'une vibration est définie par l'azimut A compté dans le sens trigonométrique à partir de l'horizontale. J'appellerai division repère d'une vibration, la division α_m du cercle divisé de l'analyseur définie dans le paragraphe précédent. Lorsque la vibration est elliptique, on peut définir de même les deux quantités A et α_m relatives au grand axe de l'ellipse. Si α_H est la division repère d'une vibration incidente horizontale, on a pour une vibration quelconque :

$$A = \alpha_m - \alpha_H.$$

b) **Détermination de la division repère.** — Pour déterminer la division repère d'une vibration quelconque, on opère de la façon suivante : une première mesure grossière permet de déterminer approximativement α_m ; on détermine

ensuite les quatre droites $\delta = f(\alpha)$ en relevant quatre points de chacune d'elles dans un intervalle de 10 à 15 degrés (fig. 24). Le relevé des 16 points se fait par enregistrement, comme je l'ai indiqué dans la première partie, et en faisant tourner l'analyseur toujours dans le même sens. Les quatre droites tracées sur le même graphique donnent quatre points d'intersection d'où l'on déduit α_m ; le signe de la pente des droites permet de déterminer cette valeur sans ambiguïté. Cette opération est effectuée pour les deux sens de rotation de l'analyseur dans le même temps et on prend la moyenne des deux valeurs trouvées pour α_m . On élimine ainsi les erreurs que peut introduire la légère diminution du coefficient d'amplification pendant la durée de la mesure. L'écart entre les deux valeurs trouvées dépasse rarement 5 minutes. La détermination d'une division repère demande environ trois heures.

c) **Détermination des axes de l'ellipse.** — Dans le cas particulier de l'étude de la lumière polarisée par réflexion, l'orientation des surfaces étudiées est en général telle que le plan d'incidence soit un plan de symétrie. Dans ces conditions :

1° Une vibration rectiligne incidente dirigée parallèlement ou perpendiculairement au plan d'incidence (plan horizontal) n'est pas modifiée par la réflexion; ceci permet d'envoyer dans l'analyseur une vibration d'orientation connue ;

2° Deux vibrations rectilignes incidentes symétriques par rapport au plan horizontal donnent par réflexion deux vibrations elliptiques qui restent symétriques par rapport à ce plan; ceci permet de vérifier le fonctionnement correct de l'analyseur.

3° De plus, une vibration incidente donnée est fournie par deux positions du polariseur à 180° l'une de l'autre. En prenant la moyenne des valeurs trouvées pour ces deux positions, on compense, au moins partiellement, les erreurs introduites par les défauts de l'appareil et les défauts de réglage.

Si alors A_0 est l'azimut de la vibration incidente dont on

veut étudier la réflexion, on opère de la façon suivante : on détermine α_m pour les huit positions du polariseur correspondant aux azimuts $0^\circ - 90^\circ - A_0 - (180^\circ - A_0)$ de la vibra-

PREMIÈRE SÉRIE DE MESURES COMPLÈTE.

Azimet de la vibration incidente		Lectures de l'analyseur	Moyennes	α_m	A		
0°	$\uparrow$	$155^\circ 12'$	$\left. \begin{array}{c} \\ \end{array} \right\} 155^\circ 06'$	$\left. \begin{array}{c} \\ \\ \end{array} \right\} \alpha_H = 155^\circ 08'$			
	$\downarrow$	155°					
90°	$\rightarrow$	$65^\circ 10'$	$\left. \begin{array}{c} \\ \end{array} \right\} 65^\circ 10'$				
	$\leftarrow$	$65^\circ 10'$					
45°	$\searrow$	$287^\circ 37'$	$\left. \begin{array}{c} \\ \end{array} \right\} 287^\circ 31'$	$\alpha_1 = 287^\circ 31'$	$A_1 = 47^\circ 36'$		
	$\nearrow$	$287^\circ 25'$					
135°	$\swarrow$	$202^\circ 45'$	$\left. \begin{array}{c} \\ \end{array} \right\} 202^\circ 44'$	$\alpha_2 = 202^\circ 44'$	$A = 132^\circ 23'$		
	$\nearrow$	$202^\circ 42'$					

DEUXIÈME SÉRIE DE MESURES.

A _o	Lectures de l'analyseur	Moyennes	α _m	A
45° ↘ ↗	287°20' 287°10'	{ 287°15'	α ₁ = 287°15'	A = 132°19'
135° ↘ ↗	202°55' 202°20'			

tion incidente. Des mesures relatives à 0° et 90° on déduit α_H , les quatre autres mesures donnent α_m . Si l'on est sûr du fonctionnement correct de l'appareil, on peut se dispenser des deux premières mesures. On déduit A des valeurs α_1 et α_2 rela-

tives à A_0 et $(180 - A_0)$: $A = \frac{1}{2}(\alpha_1 - \alpha_2) + 90^\circ$; mais on n'a alors aucun élément de vérification. Le tableau ci-contre donne, à titre d'exemple, l'étude de la lumière réfléchie sur une lame de spath perpendiculaire à l'axe pour $A_0 = 45^\circ$.

L'écart entre les valeurs trouvées pour α_m dans les deux séries de mesures est dû simplement au fait que, pour chaque réglage, le zéro de la graduation n'est ramené qu'approximativement à la même position.

d) **Détermination de l'ellipticité.** — Comme je l'ai déjà indiqué, le prisme quart d'onde n'est pas parfait et dévie légèrement le faisceau. Il en résulte que les axes YY' et ZZ' ne sont plus parallèles ; la relation simple reliant la rotation de l'analyseur à la rotation du mouvement général donnée page 54 n'a plus de sens. On doit donc déterminer l'ellipticité par une mesure qui ne nécessite pas la rotation du mouvement général. Au lieu de déterminer 2ψ par la méthode donnée au chapitre I^{er}, on détermine l'angle ψ qui est égal à l'angle de la vibration émergente avec l'axe lent du quart d'onde. Pour déterminer la division repère α_Q de cet axe, il faut remarquer que :

1^o Cette division α_Q est la même quelle que soit l'orientation du mouvement général ;

2^o Le quart d'onde transforme une vibration rectiligne en une vibration elliptique dont les axes sont confondus avec ceux du quart d'onde.

Le mode opératoire est alors le suivant :

Le quart d'onde étant réglé, on amène le polariseur à la position donnant de la lumière vibrant verticalement, de façon que le faisceau reste polarisé rectilignement après réflexion. L'axe lent du quart d'onde est rendu approximativement vertical (l'ellipticité de la vibration émergente doit être assez faible pour ne pas diminuer la précision. Si A est nettement différent de 45° , on peut utiliser le quart d'onde dans sa posi-

tion définitive). On détermine alors la division repère correspondant à la vibration émergente : elle est égale à α_Q . Le polariseur est alors ramené à sa position primitive, et l'axe lent du quart d'onde est placé parallèlement au grand axe de la vibration incidente. On détermine alors la division α_m' et on a : $\psi = | \alpha_m' - \alpha_Q |$.

Si la différence $\alpha_m' - \alpha_Q$ est positive la vibration est sinistrorsum et inversement.

Comme vérification, on répète la mesure précédente après rotation du quart d'onde, c'est-à-dire du mouvement général, de 90° . On pourrait répéter la détermination de ψ pour les quatre positions du polariseur comme dans le cas de la détermination des axes ; cependant, la fragilité du prisme oblige à opérer rapidement et à réduire le nombre des mesures.

e) **Précision.** — La précision est limitée par les défauts de l'analyseur ; en opérant comme il vient d'être indiqué, il semble que l'on puisse espérer déterminer l'orientation des axes d'une vibration elliptique à 10 minutes près. Toutefois, il importe de signaler que, pour obtenir des résultats aussi cohérents que ceux donnés comme exemple, il est nécessaire que les réglages soient très bien faits ; c'est pourquoi j'ai utilisé des procédés d'auto collimation. La précision sur la mesure de ψ est du même ordre ; si le nombre des mesures est moindre, les conditions sont en général plus favorables : la forme du faisceau ne change pas et les rotations à mesurer sont généralement faibles. L'erreur sur la mesure de l'angle ψ n'est pas la seule erreur qui peut s'introduire dans la mesure de l'ellipticité. Toutefois il est bien connu que les défauts du quart d'onde et les erreurs d'orientation n'introduisent que des erreurs du second ordre (1).

(1) CHAUMONT : *Thèse*. Paris, 1914.

CHAPITRE III

APPLICATION A L'ÉTUDE DE LA RÉFLEXION SUR LA CALCITE

La calcite possède entre $6,6\mu$ et 7μ une zone de réflexion sélective pour les rayons ordinaires, alors que les rayons extraordinaires ne présentent dans cette région aucune bande de réflexion ⁽¹⁾. De ce fait, un faisceau de radiations polarisé rectilignement doit être, après réflexion sur une lame de calcite, transformé en un faisceau, polarisé elliptiquement, dont les caractéristiques varient avec l'orientation de l'axe optique par rapport au plan d'incidence et à la surface réfléchissante. Je me suis proposé d'étudier ces phénomènes de polarisation et de comparer les résultats obtenus aux propriétés déjà connues ⁽²⁾. J'ai utilisé trois orientations de l'axe : axe perpendiculaire à la surface réfléchissante ; axe parallèle à la surface et au plan d'incidence ; axe parallèle à la surface et normal au plan d'incidence. Toutes les mesures ont été faites pour une incidence de 45° et pour une longueur d'onde de $6,80\mu$ (largeur de la bande spectrale utilisée $0,1\mu$). Les états de polarisation de la lumière réfléchie sont caractérisés par le rapport $\frac{E_P}{E_N}$ des amplitudes imaginaires de la composante parallèle et de la composante perpendiculaire au plan d'incidence : $\frac{E_P}{E_N} = \rho e^{i\Delta}$, ρ est le rapport des amplitudes maxima, Δ est la différence de phase.

(1) NYSWANDER : *Phys. Rev.*, 28, 1909, p. 291.

(2) Les résultats des travaux sur ce sujet sont résumés dans : LECOMTE : *Le spectre infra-rouge*.

a) **Surface réfléchissante taillée parallèlement à l'axe.** — J'ai utilisé une des faces d'une lame à faces parallèles que M. Cotton a mis aimablement à ma disposition. Cette lame, de 8 mm d'épaisseur, possède en outre deux facettes perpendiculaires aux faces et approximativement normales à l'axe.

ORIENTATION DE L'AXE. — Pour orienter l'axe, j'ai d'abord repéré avec précision la position de cet axe par rapport à la normale à une des facettes f . Cette opération se fait aisément en utilisant la croix noire du spath : le centre de la croix défi-

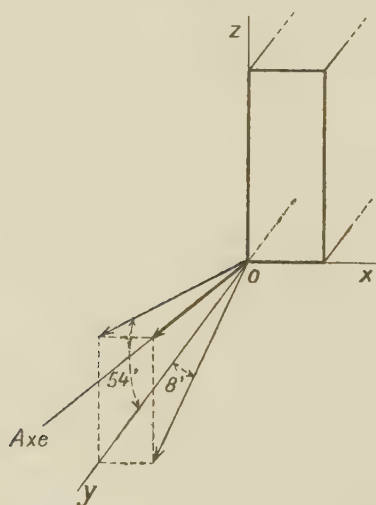


Fig. 26. — Orientation de l'axe.

ZOY. Plan de la face utilisée. — Pour la clarté de la figure, les valeurs des angles ne sont pas respectées.

nit le rayon qui s'est propagé dans le cristal parallèlement à l'axe. Etant donné la grande épaisseur de la lame dans la direction de l'axe (5 cm), on peut pointer le centre de la croix à quelques minutes près. La figure 26 indique la position exacte

de l'axe. On voit que le parallélisme de l'axe et des faces est réalisé à quelques minutes près. Pour placer l'axe optique dans le plan horizontal il suffit de rendre la facette f verticale puis de faire tourner la lame de $54'$ dans le sens convenable autour de l'axe perpendiculaire à ses faces. On pourrait songer à utiliser la méthode classique d'orientation d'une lame entre polariseur et analyseur croisés en prenant le polariseur du montage lui-même. Cette méthode est très peu précise : des essais m'ont montré qu'il était impossible d'orienter ainsi l'axe avec une précision supérieure à $30'$.

I. L'AXE OPTIQUE EST DANS LE PLAN D'INCIDENCE. — Un faisceau de lumière dont le plan de vibration est horizontal (rayons extraordinaires) donne un faisceau réfléchi d'intensité pratiquement nulle : je n'ai observé aucune déviation du galvanomètre quelle que soit la position de l'analyseur. Il en résulte que, pour une vibration incidente quelconque, l'amplitude de la composante horizontale de la vibration réfléchie est très faible par rapport à celle de la composante verticale. On doit donc recueillir une vibration presque rectiligne et dirigée perpendiculairement au plan d'incidence. J'ai vérifié en effet que pour $A_0 = 45^\circ$ et $A_0 = 135^\circ$, on trouve deux valeurs de α_m égales à $30'$ près, ce qui conduit à $A \simeq 90^\circ$. $\frac{1}{2}$ a été trouvé inférieur à 1° ; les erreurs expérimentales ne permettent pas de donner sa valeur avec précision; on peut cependant affirmer que la vibration est dextrorsum pour $A_0 = 45^\circ$. La valeur de ρ est dans ce cas inférieure à 0,01, mais la valeur de Δ est mal déterminée

II. L'AXE OPTIQUE EST PERPENDICULAIRE AU PLAN D'INCIDENCE. — Dans ce cas, c'est lorsque le plan de la vibration incidente est vertical (rayons extraordinaires) que le faisceau réfléchi est peu intense; cependant, son intensité est encore égale au dixième de l'intensité du faisceau correspondant à une vibration incidente horizontale. Les mesures faites pour $A_0 = 45^\circ$ ont conduit aux résultats suivants :

$$\begin{array}{lll} A_0 = 45^\circ & A = 168^\circ 35' & \rho = 3.47 \\ & \psi = 11^\circ 37' & \Delta = 132^\circ 03' \end{array}$$

Vibration sinistrorsum.

b) **Surface réfléchissante taillée perpendiculairement à l'axe.** — J'ai utilisé une lame taillée perpendiculairement à l'axe; en réalité, l'axe de cette lame fait un angle de 15 minutes avec la normale à la surface. Au cours des mesures, il était placé dans le plan d'incidence.

Le pouvoir réflecteur est sensiblement le même quelle que soit la vibration incidente :

$$\begin{array}{lll} \text{Pour } A_0 = 45^\circ, \text{ on a } A = 132^\circ 40' & \rho = 0,915 \\ & \psi = 7^\circ 40' & \Delta = 164^\circ 36' \end{array}$$

Vibration sinistrorsum.

La figure 27 schématise ces trois résultats.

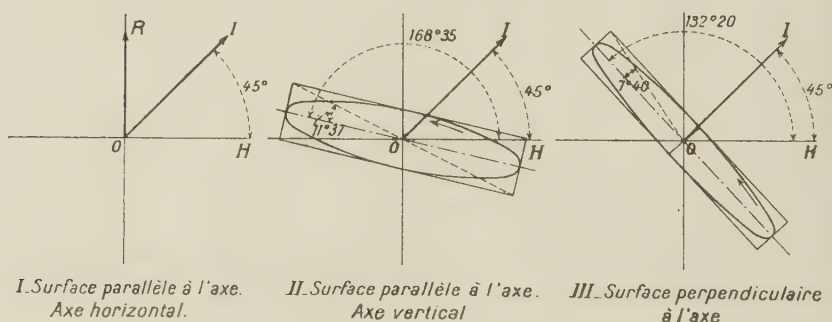


Fig. 27. — Résumé schématique des résultats.

*
* *

Pour interpréter ces résultats, il faut rappeler que les propriétés optiques d'un cristal sont caractérisées par l'indice ordinaire N_o et l'indice extraordinaire principal N_e qui sont imaginaires et de la forme :

$$N = n(1 + i\chi)$$

χ étant l'indice d'extinction défini par $L \frac{I_0}{I} = \frac{4\pi Z}{\lambda} \chi$.

Drude ⁽¹⁾ a développé la théorie de la réflexion sur une surface cristalline et donné les formules qui relient ces indices aux quantités ρ et Δ dans les trois cas particuliers étudiés. Ces équations montrent qu'il est impossible de déterminer séparément N_o et N_e à partir des phénomènes de polarisation. On est donc amené à résoudre un système de deux équations à deux inconnues; en général, ceci ne peut se faire que par approximations successives. Je n'insisterai pas sur la résolution de ces équations. J'indiquerai simplement que j'ai utilisé les deux équations fournies par la même lame dans les positions I et II. Les particularités du cas I simplifient la résolution des équations, mais l'incertitude sur Δ nuit à la précision des résultats. Les quantités déterminées avec précision sont n_o^2 ($1 - \chi_o^2$) et n_e ; quant à χ_e , il est très faible (inférieur à 0,001). J'ai obtenu les résultats suivants :

$$\begin{aligned} n_e &= 1,45 \\ n_o(1 - \chi_o^2) &= 10 \\ n_o &\simeq 0,085 \\ \chi_o &\simeq 36. \end{aligned}$$

A titre de vérification, j'ai calculé, à partir de ces indices, quelles devaient être les valeurs de A et de ψ pour une surface réfléchissante normale à l'axe et pour $A_o = 45^\circ$. On trouve $A \simeq 134^\circ$ et $\psi \simeq 8^\circ 30'$. Etant donné l'imprécision sur n_o et χ_o , cette vérification est satisfaisante.

Les résultats obtenus sont encore trop peu nombreux pour permettre une détermination précise des indices, une étude en fonction de l'angle d'incidence serait nécessaire; toutefois, ils conduisent à des conclusions en accord avec les travaux antérieurs; en particulier :

1° L'indice d'extinction pour les rayons extraordinaires est très faible, mais il ne faut pas oublier que cette valeur de χ_e correspond seulement au cas où ces rayons se propagent dans

(1) DRUDE : *Ann. der Physik.*, **32**, 1887, p. 584.

un plan perpendiculaire à l'axe. Du fait que χ_0 est très grand, dès que la normale au plan de propagation est légèrement écartée de l'axe, le coefficient d'absorption des rayons extraordinaires doit augmenter rapidement. Ceci est en accord avec le fait qu'une lame de 0,14 mm dont la face fait un angle de 70° avec l'axe est complètement absorbante (Coblentz), alors qu'une lame de 0,1 mm parallèle à l'axe laisse passer 50 % de la lumière reçue (Matossi et Dane).

2° Si, à partir des résultats trouvés, on calcule le pouvoir réflecteur relatif aux rayons extraordinaires, on vérifie qu'il peut varier considérablement suivant l'angle du rayon moyen du faisceau et de l'axe optique et suivant l'orientation de la surface par rapport à cet axe. En particulier, le pouvoir réflecteur doit être pratiquement nul dans le cas I et égal à 8 % dans le cas II. Ce dernier résultat est en bon accord avec les travaux de Nyswander. Le pouvoir réflecteur relatif aux rayons ordinaires reste au contraire toujours voisin de 1.

RÉSUMÉ

Si, grâce à un amplificateur des déviations du galvanomètre, il est possible, en principe, d'augmenter considérablement la sensibilité d'un ensemble pile thermo-électrique galvanomètre, on est rapidement limité dans cette voie par le manque de stabilité de l'appareil ainsi réalisé. J'ai montré dans la première partie de ce travail que, pour des valeurs du coefficient d'amplification comprises entre 30 et 150, on pouvait éliminer les principales causes d'instabilité et réaliser un appareil dont le zéro présente seulement une dérive lente qui ne gêne nullement les mesures faites par enregistrement.

Au cours de ce travail, j'ai été amené à étudier deux types d'amplificateur. L'un d'eux possède une inertie très faible et permet de reproduire exactement les mouvements très rapides d'un miroir ; l'autre au contraire possède une inertie réglable : sa constante de temps peut varier de quelques secondes à plusieurs minutes. Le premier de ces montages m'a permis d'étudier les fluctuations du spot de deux galvanomètres de type différent et de montrer que :

1° On élimine presque totalement l'action des vibrations du sol en plaçant le galvanomètre et la partie optique de l'amplificateur sur un support en pendule renversé (type Muller) à grande période ;

2° Pour les fluctuations qui subsistent, la valeur du carré moyen des déviations est bien égale à la valeur prévue par la théorie des fluctuations.

Le second montage permet, par un choix judicieux de la constante de temps, de réduire considérablement l'amplitude des déplacements de zéro et de travailler avec un spot prati-

quement stable pour des temps de réponse qui ne sont pas prohibitifs (1 à 4 minutes).

Le fait d'introduire la pile dans le circuit du galvanomètre altère profondément la stabilité de l'appareil. J'ai montré que *tous* les mouvements rapides du spot et une partie des déplacements lents de zéro sont dus aux variations de la pression atmosphérique et qu'on peut les éliminer en enfermant la pile dans une enceinte étanche. Les déplacements de zéro qui subsistent sont dus à des effets électriques et à des effets thermiques. Ils se réduisent à une dérive lente du spot, à condition d'avoir un isolement parfait du circuit de la pile et de placer les appareils dans une salle où l'opérateur n'entre pas au cours des mesures. Cette dérive est d'ailleurs due en partie à la diminution du coefficient d'amplification ; celle-ci ne dépasse pas 1 % à l'heure.

Dans la seconde partie, j'ai réalisé un montage polarimétrique utilisant la pile précédemment étudiée et permettant l'analyse d'une vibration elliptique dans la région spectrale comprise entre 2 et 10 μ . La détermination des axes de l'ellipse se fait en utilisant un analyseur à miroir de sélénium fonctionnant comme un appareil à pénombre avec un angle de pénombre de 90°. La précision des mesures est limitée principalement par le fait que la sensibilité de la pile varie avec la forme de l'impact du faisceau sur sa surface réceptrice. J'ai montré que, moyennant certaines précautions, on pouvait cependant déterminer l'orientation d'une vibration à 15 minutes près.

La détermination de l'ellipticité se fait par la méthode du quart d'onde. J'ai proposé d'utiliser comme quart d'onde un parallélépipède de Fresnel en sel gemme.

J'ai étudié la réflexion sélective sur une lame de calcite pour $\lambda = 6,8 \mu$ et pour trois orientations particulières de l'axe du cristal. Les résultats obtenus sont en bon accord avec les propriétés optiques de la calcite déterminées par des méthodes totalement différentes.

*
* *

Ce travail a été effectué au laboratoire de physique de l'Ecole normale supérieure. C'est pour moi un agréable devoir d'exprimer ici à M. H. Abraham toute ma reconnaissance pour les facilités matérielles qu'il m'a procurées, et surtout pour les précieux conseils et les encouragements que j'ai trouvés près de lui. Je suis heureux de remercier également MM. E. Bloch et G. Bruhat, dont les avis éclairés m'ont été souvent fort utiles. Ces recherches ont pu être achevées grâce à une subvention du Comité national d'aide à la recherche scientifique. Je tiens à lui exprimer toute ma gratitude.

Enfin, je dois de sincères remerciements au personnel du laboratoire dont le dévouement a facilité mon travail.

DEUXIÈME THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

LA DÉCOUVERTE DE L'ÉLÉMENT 72 ET LA CLASSIFICATION PÉRIODIQUE
DES ÉLÉMENTS

VU ET APPROUVÉ :

Paris, le 3 juin 1935.

Le Doyen de la Faculté des Sciences,
CH. MAURAIN.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

Le Recteur de l'Académie de Paris,
S. CHARLÉTY.

